

Computersimulation und Intervention

Eine Methode der Technikentwicklung als Vermittlungsinstrument soziotechnischer Umordnungen

Vom Fachbereich Gesellschafts- und Geschichtswissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Philosophie (Dr. phil.)

genehmigte Dissertation

von

Philine Warnke
aus Münster

Referenten:
Prof. Dr. Gernot Böhme
Prof. Dr. Rudi Schmiede

Tag der Einreichung: 13. Februar 2002
Tag der Prüfung: 11. Juli 2002

Darmstadt 2002
D 17

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
1.1	Methoden der Technikentwicklung als Untersuchungsgegenstand – Überlegungen zum theoretischen Hintergrund	3
1.2	Gang der Untersuchung	8
1.3	Ein Modellbegriff	9
1.3.1	Technische Begriffsbestimmungen	10
1.3.2	Der Modellbegriff in den Naturwissenschaften	11
1.3.3	Modelle zwischen Theorie und Welt - Der Modellbegriff in der Wissenschaftstheorie	12
1.4	Modellierung als gesellschaftliche Praxis	17
1.4.1	Modellierung als Umordnung - Einführung einiger Analysebegriffe	17
1.4.2	Modellierung als Wissensstrukturierung	22
1.4.3	Modellierung und Finalisierung	24
2	Technikwissenschaftliche Computersimulation – Erste Annäherungen an den Gegenstand	26
2.1	Vorläufer und Verbreitung	26
2.2	Anwendungsgebiete und Einsatzweisen	27
2.3	Computersimulation in Ingenieurausbildung und industrieller Praxis	32
2.4	Bedeutung der Software	33
2.5	Bedeutung der Visualisierung	35
2.6	Die wechselseitige Abhängigkeit zwischen Rechnertechnik und Computersimulation	36
2.7	Laborzurichtungen und Laborausweitungen – Erste Thesen über die Zusammenhänge	36
3	Wie die Welt in den Computer kommt – Die einzelnen Modellbildungsansätze	40
3.1	Vorüberlegungen	40
3.2	Modellierungsansätze – Unterscheidungen und Klassifikationen	41
3.3	Vorüberlegungen zur analytischen Modellierung	44
3.4	Die Finite Elemente Methode	51
3.4.1	Schneller, billiger, besser – Neue Welten aus Finiten-Elementen	51
3.4.2	Das Grundprinzip finiter Modellierung	56
3.4.3	Idealisierung – Erste finite Transformationen	57
3.4.4	Weitere finite Formalisierungen	65
3.4.5	Das Simulationsexperiment	65
3.4.6	Aus- und Bewertung der Rechenergebnisse	67
3.4.7	FEM in der Praxis – Schnittstellen und andere finite Stolpersteine	69
3.4.8	Finite Software Elemente	72
3.4.9	Auf der Spur der finiten Wissensqualität – Vom Behälterdeckel zum Stabziehen	74
3.4.10	Neue Brücken statt alter Krücken? Das FEM-Modell als epistemologischer Hybrid und autonomes Instrument	88
3.4.11	Analytisch basierte Computersimulation als Finalisierung?	90
3.4.12	Näher an die Realität mit Computersimulation?	91
3.4.13	Zusammenfassung – Die FEM als Stabil-Mobil	92
3.4.14	Finite Soziale Elemente	95
3.4.15	Exkurs: Das Numerische Experiment als dritte Methode der Wissenschaften?	99

3.5	Fuzzy-Modellierung.....	104
3.5.1	Vorbemerkung.....	104
3.5.2	Fusselige Modelle – Das Modellierungsverfahren	104
3.5.3	Anwendungsfelder fusseliger Übersetzungen	110
3.5.4	Erste Zusammenfassung und Gang der Untersuchung	112
3.5.5	Reichen fusselige Regeln weiter als naturwissenschaftliche Formeln?	113
3.5.6	Eigenschaften fusseliger Artefakte	115
3.5.7	Ist Fusseligkeit menschlich?	120
3.5.8	Fuzzy-Logik und klassische Steuerungstechnik – Ein fusseliges Verhältnis.....	124
3.5.9	Fuzzy-Modellierung als universelle Funktionsapproximation	125
3.5.10	Wie schwarz ist ein Fuzzy-Modell?.....	127
3.5.11	Umordnungen im Fuzzy-Computerlabor.....	128
3.5.12	Fusselige Anteile soziotechnischer Strukturen	130
3.5.13	Fazit.....	132
3.6	Konnektionistische Modelle – Die verteilte Welt.....	134
3.6.1	Einführung in die Netzwelt.....	134
3.6.2	Netz-Typisches und Netz-Typen	135
3.6.3	Die Welt im Netz.....	140
3.6.4	Umordnungen im Konnektionistischen Computerlabor	149
3.6.5	Wessen Wissen?	159
3.6.6	Konnektionistische Strickmuster – Neuro-Artefakte und ihre Verflechtungen mit anderen soziotechnischen Strukturen	162
3.7	Die drei Modellierungsverfahren im Vergleich	168
3.7.1	Rekonfigurationen im Computerlabor	168
3.7.2	Modellierung und Wissensstrukturierung – Simulation und Partizipation	173
3.7.3	Eigenschaften simulierter Artefakte.....	178
4	Das Simulationsbild als Weltbild	186
4.1	Warum eine Visualisierung mehr als tausend Zahlen sagt	186
4.2	Die Bildproduktion - Malen nach Zahlen	188
4.2.1	Ausgangspunkt Simulationsexperiment und Zahlenhaufen.....	188
4.2.2	Die Übersetzungstechniken	188
4.3	Die Bildelemente.....	196
4.4	Was transportiert das Simulationsbild?	199
4.4.1	Das Simulationsbild als Argument.....	200
4.4.2	Die Rhetorik der Simulationsvisualisierung	201
4.5	Das Simulationsbild als Mobilisator – Von Zusammenzeichnungen und Zusammenziehungen.....	204
4.6	Die Auswertung von Simulationsvisualisierung - Eine Sache für Expertinnen?.....	206
4.6.1	Voraussetzungen für Entschlüsselungen	206
4.6.2	Interpretation von Simulationsvisualisierung - Eine Renaissance bildlichen Denkens in der Technikentwicklung?	208
4.7	Differenzen und Parallelen zu anderen technisch wissenschaftlichen Bildgattungen	210
4.7.1	Technisch unterstütztes Sehen	211
4.7.2	Die wissenschaftliche Illustration.....	213
5	Schlußfolgerungen und Ausblick	217
6	Literaturverzeichnis	221

1 Einführung

1.1 Methoden der Technikentwicklung als Untersuchungsgegenstand – Überlegungen zum theoretischen Hintergrund

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht mit der computergestützten Simulation ein mächtiges Werkzeug moderner Technikentwicklung. Computersimulationen sind heutzutage bei einer Vielzahl technischer Projekte in der einen oder anderen Weise beteiligt. Dabei beeinflussen sie auf verschiedenen Ebenen der Analyse und Bearbeitung technischer Problemstellungen das Vorgehen. Simulationen unterstützen beispielsweise bei der Berechnung konkreter Bauteile in der Endphase einer Konstruktion und erleichtern es, Konzepte zur Steuerung und Regelung technischer Systeme zu entwickeln. Sie ermöglichen es aber auch, grundlegende Eigenschaften interessierender Weltausschnitte¹ schon in einem sehr frühen Stadium technikwissenschaftlicher Forschung zu erkunden. Computersimulation wird damit immer mehr zu einer wesentlichen Methode der Generierung, Verarbeitung und Anwendung von Wissen über Welt. Dabei verändert die wachsende Bedeutung dieses Wissenswerkzeuges die Ingenieurwissenschaften deutlich. Sowohl in der Lehre als auch in der Praxis finden einschneidende Umstrukturierungen der Lern- und Arbeitsweisen statt. In dieser Arbeit werden Simulationstechniken jedoch nicht primär in ihrer Bedeutung für interne Belange der Ingenieurwissenschaften untersucht. Vielmehr geht es hier darum, die beobachteten Umstrukturierungen technikwissenschaftlicher Methodik in einen gesellschaftlichen Kontext zu stellen. Dabei bewegt sich diese Untersuchung vor dem Hintergrund einer Reihe von Studien der Wissenschafts- und Technikforschung, in denen technisch/wissenschaftliche Methoden als Teil einer historisch gewachsenen, von kulturellen und gesellschaftlichen Bedingungen geprägten Umgangsweise mit Welt aufgefaßt werden.

Die Wissenschaftsforschung hat sich ausgiebig mit dem Entstehen naturwissenschaftlicher Theorie und später – nach der sogenannten pragmatischen Wende – auch mit wissenschaftlicher Forschungspraxis auseinandergesetzt. In dem unter „Science and Technology Studies“ oder „Science, Technology, and Society“ (STS) bekanntgewordenen Forschungsprogramm wird mit den verschiedensten Zielen und Ansätzen untersucht, wie wissenschaftliches und technisches Wissen in kulturelle und soziale Kontexte eingebunden ist.² Dabei hat die These, wissenschaftliches Wissen sei inhaltlich von sozialen Bedingungen beeinflusst, heftige Debatten bis hin zum sogenannten Wissenschaftsstreit („Science wars“) ausgelöst. Demgegenüber ist die Frage nach den Determinanten von Technikentwicklung weniger spektakulär diskutiert worden. Während einige STS Forscherinnen und Forscher Technikentwicklung schlichtweg als Anwendung von Naturwissenschaft ansehen und daher keine gesonderte Untersuchung für nötig halten, sehen andere die „soziale Konstruiertheit“ von Technikentwicklung als wenig brisant gegenüber naturwissenschaftlicher Wissenskonstruktion an.³ Für technikwissenschaftliche Forschungen ist es im Gegensatz zu den Naturwissenschaften zunächst unmittelbar einsichtig, daß Anforderungen von außen z. B. an

1 Wenn im folgenden von Welt oder Weltausschnitten die Rede ist, dann ist nicht etwa eine unberührte von menschlicher Wahrnehmung und Verarbeitung unabhängige Welt oder Natur gemeint. Stattdessen handelt es sich bei Gegenständen naturwissenschaftlicher Untersuchungen immer schon um eigens zugerichtete Stücke von Welt und damit um Natur unter sozialen Bedingungen (vgl. Böhme (1992a, S. 34)). Dies gilt erst recht für die hier behandelten Formalisierungen von Welt für technische Zwecke. Auch komplexe industrielle Prozesse, die selbst menschliche Einrichtungen enthalten, können hier mit „Weltausschnitt“ gemeint sein.

2 Eine Einführung in das STS Forschungsfeld gibt das in Zusammenarbeit mit der „Society For Social Studies of Science (4S)“ herausgegebene „Handbook of Science and Technology Studies“ (Jasanoff u. a. 1995). Eine Sammlung verschiedener Ansätze zur „pragmatischen Wende“ findet sich in Pickering (1992).

die Effizienz und die Funktion technischer Artefakte die Ergebnisse beeinflussen. Daß technische Artefakte „konstruiert“ sind, ist daher an sich keine aufregende Feststellung. Strittig ist es jedoch, in welcher Weise die Entwicklung technischer Artefakte durch gesellschaftliche Faktoren beeinflusst wird. Innerhalb der Ingenieurwissenschaft selbst werden „externe“ Einflüsse keineswegs abgestritten. Allerdings wird in der Regel davon ausgegangen, daß diese ausschließlich auf die Bestimmung der Problemstellung und die Festlegung der erlaubten Kosten einwirken. Die Konstruktion des optimalen Artefakts innerhalb dieses Rahmens ist dann die eigentliche Aufgabe des Ingenieurs und wird nach Maßgabe technischer Rationalität erfüllt.⁴ Demgegenüber haben sozialwissenschaftliche Untersuchungen technischer Entwicklungen ergeben, daß ein komplexes Zusammenspiel sozialer, kultureller und materieller Strukturen die Variations- und Selektionsprozesse kennzeichnet, die zu der Etablierung technischer Artefakte führen. Die Trennung zwischen interner technischer „Sachlogik“ und externen „sozialen“ Einflüssen kann demnach nicht aufrecht erhalten werden. Technische Entwicklung kann aus dieser Sicht nur als ein Teil gesellschaftlicher Entwicklung analysiert werden. Neuere Technik-Studien haben sowohl die Entwicklung als auch die Interpretation und Nutzung technischer Artefakte als Aushandlungsprozeß zwischen verschiedenen Gruppen von Akteuren beschrieben. Hier ist vor allem das „Social Construction of Technology (SCOT)“ Programm von Trevor Pinch und Wiebe Bijker (1987) zu nennen. An dem Beispiel des Fahrrads entwickeln Pinch und Bijker ein differenziertes Modell der Entwicklung technischer Artefakte und stellen damit lineare Modelle technischer Entwicklung in Frage, wie sie innerhalb der Technikgeschichtsschreibung lange dominierten. Eine technologische Entwicklung ist nach dem SCOT Ansatz dann abgeschlossen, wenn für die „relevanten sozialen Gruppen“⁵ kein weiterer Entwicklungsbedarf mehr besteht.⁶ Aufbauend auf solchen Ergebnisse wurden in der sozialwissenschaftlichen und historischen Technikforschung verschiedene Konzepte dafür entwickelt, die fundamentale Unterscheidung zwischen „Technisch“ und „Sozial“ aufzulösen und gesellschaftliche Wirklichkeit als ein nahtloses Netzwerk (seamless web) aus heterogenen Elementen zu verstehen.⁷ Dabei gerät einerseits in den Blick, wie technische Einrichtungen dazu dienen, Handlungsweisen zu strukturieren und bestimmte Machtkonstellationen zu stabilisieren, andererseits werden aber auch technische Strukturen als Ergebnis der Handlungsweisen bewußt agierender Akteure interpretierbar. Auch innerhalb der im deutschsprachigen Raum etablierten „Technikgeneseforschung“ wurden Ansätze entwickelt, technische Entwicklungen als soziale Prozesse zu analysieren.⁸ Dabei ist es häufig das Ziel, Konzepte für eine erfolgreiche Steuerung technischer Entwicklungen, bereitzustellen, wie sie die klassische Technikfolgenabschätzung nicht entwickeln konnte.⁹ Der Fokus auf die soziale

3 Vgl. z. B. Knorr Cetina (1995, S. 149): „When Pinch and Bijker asked that the same principles and methods that guide constructionist studies of science be applied to technology, little controversy ensued about whether technological artifacts could be seen as constructed. It seemed clear that they could;“

4 Vgl. Beitz/Küttner (1987) F5 und F8, sowie die VDI-Richtlinien 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte und 2225: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren.

5 Pinch/Bijker (1987, S. 30).

6 Hård (1993) kritisiert das SCOT Programm, meiner Ansicht nach zurecht, für die Betonung des Konsens zwischen den relevanten sozialen Gruppierungen. Dadurch gerät außer Sicht, daß die „Relevanz“ einer Gruppierung eine Frage gesellschaftlicher Machtverteilung ist.

7 Verschiedene solcher Konzepte werden in Bijker/Law (2000) vorgestellt.

8 Einen Überblick über die Entwicklung der Technikgeneseforschung gibt Knie (1997).

Konstruktion technischer Systeme läßt jedoch nicht den Schluß auf eine leichte Steuerbarkeit technischer Entwicklung zu. Gerade die enge Verwobenheit mit gesellschaftlichen Verhältnissen ist es, die technischen Strukturen eine hohe Stabilität verleiht, so daß sie den mit ihr konfrontierten Individuen als ein „materielles Dispositiv“¹⁰ gegenübertreten.

Um die Ausbildung soziotechnischer Strukturen zu untersuchen, wird in sozialwissenschaftlichen Untersuchungen von Technikentwicklung häufig herausgearbeitet, wie sich der kulturelle und soziale Hintergrund der Akteure der Technikentwicklung direkt in der Gestalt der entwickelten Artefakte niederschlägt.¹¹ Darüber hinaus ist es jedoch meines Erachtens notwendig, die ingenieurwissenschaftlichen Vorgehensweisen selbst auf ihre Einbettung in diesen Kontext hin zu untersuchen. Während jedoch die Methoden der Naturwissenschaften durch die Wissenschaftssoziologie und -philosophie auf vielfältige Weise analysiert werden, bleiben die Methoden der Technikentwicklung leider oft eine „Black-Box“, die nur sehr selten geöffnet wird.¹² Mir scheint es demgegenüber wichtig, die Gesellschaftlichkeit von Technikentwicklung bis in die Methodik der Ingenieurwissenschaften hinein zu verfolgen, denn es liegt nahe, daß die Form, in der technisches Wissen vorliegt, eng mit den Möglichkeiten zu seiner Verwertung zusammenhängt. Nur wenn die ingenieurwissenschaftliche Methodik, über die sich technisches Wissen in materiellen Artefakten verobjektiviert, bei der Analyse technischer Entwicklungen ebenso wie andere Einflußfaktoren als in Kultur und Gesellschaft verwurzelt begriffen wird, können evolutionäre Erklärungen für den Verlauf des „technischen Fortschritts“ wirkungsvoll in Frage gestellt werden.¹³ Die Struktur technischen Wissens muß ebenso wie die Form naturwissenschaftlicher Theoriebildung als eng verknüpft mit ihren historisch gesellschaftlichen Entstehungsbedingungen betrachtet werden.¹⁴ Eine solche Perspektive auf Technikentwicklung, wie sie auch in dieser Arbeit eingenommen wird, setzt keinesfalls einen relativistischen Begriff von wissenschaftlichem Wissen voraus. Materielle Strukturen lassen sich nicht beliebig umformen und setzen menschlichen Eingriffen Widerstände entgegen.

9 So entwickelt etwa Dierkes (1992) ein detailliertes Konzept zur Erklärung technischer Innovation aus dem Zusammenwirken verschiedener Wissensbereiche und leitet daraus Vorschläge für die Förderung bestimmter Prozesse von Wissensgenerierung ab.

10 Der Begriff des „materiellen Dispositivs“ ist im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs „Technisierung und Gesellschaft“ der TU-Darmstadt als Ausgangspunkt für eine interdisziplinäre Auseinandersetzung mit Prozessen der Technisierung entwickelt worden. Er kennzeichnet eine materielle Infrastruktur, die innerhalb von gesellschaftlichen Zusammenhängen die Handlungsmöglichkeiten der Akteure strukturiert. Eine ausführliche Darstellung findet sich im Internet auf der homepage des Kollegs unter: www.ifs.tu-darmstadt.de/gradkoll/index.html.

11 Vgl. etwa das von Carlson (2000) vorgestellte Konzept des „Bedeutungsrahmens (Frame of Meaning)“ der einzelnen Akteure der Technikentwicklung zueigen ist und als Vermittler der kulturellen und sozialen Konstruktion von Artefakten fungiert. Zur Sichtweise auf Technikentwicklung als in einen kulturellen Rahmen eingebundene Praxis vgl. Hård (1994a).

12 Ausnahmen gibt es jedoch durchaus: Vgl. z. B. die Ausführungen von Bruno Latour (1988) über die technische Zeichnung als Mobilisator technischen Wissens, die Studie über CAD (Computer Aided Design) Systeme von Kathryn Henderson (1999) sowie die Studie über die Verwissenschaftlichung der Kältetechnik von Mikael Hård (1994b), auf die hier später noch eingegangen wird. Eine Untersuchung der Entwicklung der Methodik des Konstruierens im deutschen Maschinenbau zwischen 1850 und 1930 und des Zusammenhanges dieser „Konstruktionskultur“ mit dem gesellschaftlichen Umfeld liefert König (1999).

13 Evolutionäre Beschreibungen technischer Veränderung fassen diese als einen autonomen Prozeß auf, der nach einer inneren Logik verläuft, während sich die Gesellschaft den Folgen dieser Entwicklung dann anpassen muß. Für eine differenzierte Ausführung verschiedener Konzepte mit diesem Hintergrund vgl. Elzinga (1998, S. 20 ff.).

gen. Die Art und Weise jedoch, in der ein Umgang mit diesen Strukturen zu einem Wissensbestand geformt wird und wie sich dieser Wissensbestand dann nutzen läßt, ist nicht aus der „Natur der Dinge“ zu erklären. So gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten, die Welt in Objektklassen einzuteilen, die dann durch Theoriebildungen handhabbar gemacht werden. Schon in den 1970er Jahren hat die „Starnberger Forschungsgruppe“ mit der „Finalisierungstheorie“ ein Modell dafür entwickelt, wie die Zwecke, die sich innerhalb gesellschaftlicher Strukturen durchsetzen konnten, es beeinflussen, auf welche Weise naturwissenschaftliche Grundagentheorie auf konkrete technisch relevante Phänomene heruntergebrochen wird.¹⁵ Der „Stand der Technik“ ist damit auch in der Technikentwicklung selbst nicht von seinen gesellschaftlichen Bezügen zu trennen.

Ein Zusammenhang zwischen der Art und Weise, wie für die Technikentwicklung Ausschnitte von Welt formalisiert und bearbeitet werden und dem spezifischen Rationalitätstyp, der die Gesellschaftsform kennzeichnet, innerhalb derer sich die Technikentwicklung vollzieht, ist von vielen Autoren allgemein formuliert worden. Die meisten dieser Thesen beziehen sich jedoch in einer sehr abstrakten Weise auf technisch-wissenschaftliche Rationalität insgesamt.¹⁶ Konkrete Untersuchungen zu technikwissenschaftlicher Praxis im Kontext gesamtgesellschaftlicher Entwicklungen gibt es nur wenige.¹⁷ Die Frage danach, wie die Kopplung zwischen individueller, lokaler Produktion technischer Artefakte und dem Universalitätsanspruch technischer Rationalität praktisch funktioniert, bleibt daher weiter offen.

Bei der Untersuchung solcher technikwissenschaftlicher Universalisierungsstrategien ist der gleichzeitige Blick auf theoretische und praktische Aspekte ingenieurwissenschaftlichen Arbeitens unerlässlich, da Technikentwicklung nicht auf die Anwendung von theoretischem Wissen reduziert werden kann. Vielmehr gilt es, die pragmatische Wende in der Wissenschaftsphilosophie und der Wissenschaftssoziologie auch für die Untersuchung von Technikentwicklung nachzuvollziehen und gerade die Verschrän-

14 Das bedeutet nicht, daß einfach die Ergebnisse aus der Analyse der Naturwissenschaften übertragen werden können. Wenn schon jede Naturwissenschaft ihre eigenen Praktiken der Erzeugung stabilen Wissens hat, so muß dies umso mehr für die Technikwissenschaften gelten, die auf eine andere Weise gesellschaftlich eingebunden sind als die Naturwissenschaften.

15 Weitere Ausführungen zur Finalisierungstheorie finden sich in Abschnitt 1.4.3. Für eine zusammenfassende Darstellung vgl. Böhme u. a. (1978). Als konkretes Beispiel für die Bildung einer Objektklasse, für die dann „wahre“ Aussagen über Welt möglich sind, beschreibt Böhme (1978) die Herausbildung der „Newtonschen Fluide“.

16 Solche Ansätze liefern z. B. Marcuse (1970), der die naturwissenschaftliche Methode insgesamt als Teil einer Herrschaftslogik interpretiert (S. 159 ff), sowie Ullrich (1988/79), der mit Bezug auf Marcuse, aber in einer größeren Ausführlichkeit, eine Affinität von Wissenschaft und Kapital nachzuweisen versucht. Eher auf die Herstellung einer solchen Affinität im Prozeß der Wissensanwendung ist die Untersuchung von Hack und Hack (1985) zu der industriellen Auswertung molekularbiologischer Forschung gerichtet. Urban (1986) versucht, eine Typologie technischen Wissens zu entwerfen, die ebenfalls einen Rahmen für die Analyse der Kopplung gesellschaftlicher Effizienzkriterien und der Produktion technischen Wissens liefern soll. Beniger (1986) sieht das Streben nach verbesserter Kontrolle der durch die Industrialisierung beschleunigten Bewegungen von Ressourcen als wesentlichen Antrieb neuzeitlicher technischer Neuerungen.

17 Eine Ausnahme bildet die Analyse moderner Informationstechnologien. Hier gibt es Ansätze dazu, die Methoden zur Formalisierung als Bestandteil einer gesamtgesellschaftlichen Entwicklung zu verstehen. Vgl. etwa Schmiede (1996) oder Heintz (1993).

Auch in der Informatik mehren sich die Ansätze, die Methoden der Formalisierung von Realität als Ausdruck eines bestimmten gesellschaftlich vermittelten Verhältnisses zur Welt kritisch zu hinterfragen. Auf die Parallele zu solchen Ansätzen wird noch mehrfach zurückzukommen sein (siehe auch Anm. 43).

kungen zwischen Theorie und Praxis in den Blick zu bekommen.¹⁸ Diese Verschränkungen sind in der Technikentwicklung verzweigter als in den Naturwissenschaften, da die Anzahl lokaler Produktionsstätten von Wissen ungleich höher ist. Zudem ist bei der Produktion technischen Wissens die Vernetzung verschiedener Bereiche wie Industrie und Universität, Politik und Wirtschaft, Verbraucherverbänden und anderen Interessengruppen noch stärker ausgeprägt. Zugleich ist die Kopplung zwischen Formalisierung von Welt und Weltveränderung bei der Technikentwicklung sehr direkt.¹⁹

Einen überzeugenden Ansatz für eine integrierte Analyse von Technikentwicklung bietet Mikael Hård (1994b) in seiner Untersuchung der Entwicklung der Kältetechnik. Hård beschreibt die Verwissenschaftlichung der Kältetechnik und die Etablierung des „Carnot Kreislaufes“ als technikwissenschaftliches Leitbild bei der Beurteilung von Kältemaschinen. Diese Entwicklungen analysiert Hård vor dem Hintergrund der von Max Weber entwickelten Interpretation der Entfaltung des Kapitalismus als Rationalisierung aller Lebensbereiche. Ein wesentlicher Aspekt dieses Rationalisierungsprozesses ist die „Entzauberung der Welt“ durch die rationalen Erklärungen neuzeitlicher Wissenschaft. Die Verwissenschaftlichung von Technikentwicklung kann als ein Aspekt dieser kognitiven Rationalisierung verstanden werden:

„The main thesis of the present study is that the scientification, intellectualization, and systematization of technology, as well as the increasing degree of quantification and calculability of engineering in order to make production more predictable and easy to control, are all parts of the overall rationalization of the Occident, as Weber understood it“ (ebd. S. 239)

Hård zeigt für die Kältetechnik, wie die Etablierung einer bestimmten technischen Methodik dazu beitrug, daß gerade solche Artefakte sich durchsetzten, die den Interessen der in einer spezifischen historischen Situation mächtigen Akteure besonders gerecht wurden. Auf die von Hård vorgeführte Weise lassen sich technikgenetische Untersuchungen in den Kontext gesamtgesellschaftlicher Strukturen einbinden. So wird es einerseits vermieden, daß das Ergebnis von Aushandlungsprozessen in der Technikentwicklung als ein zufälliges Produkt der vorhandenen Akteurskonstellationen betrachtet werden muß, andererseits bleibt innerhalb der strukturierenden gesamtgesellschaftlichen Entwicklung genügend Raum für einzelne Akteursgruppen, ihre eigenen Interessen zu verfolgen. Die Methodik der Technikentwicklung wird zu einem Feld, in dem sich dieser Prozeß der wechselseitigen Beeinflussung zwischen Strukturen und Akteuren niederschlägt.

18 So stellen etwa Franko Furger und Bettina Heintz (1997) in ihrer Studie über die Entwicklung eines Schweizer Computers fest: „Die pragmatische Wende in der Wissenschaftssoziologie hat auf die Techniksoziologie noch kaum Auswirkungen gehabt. Die Arbeiten zur Technikgenese, und das gilt besonders für den sozialkonstruktivistischen Ansatz, sind nach wie vor weitgehend wissenssoziologisch orientiert. Dies ist umso erstaunlicher, als sich gerade im Bereich der Technikentwicklung eine Fokussierung auf die *Praktiken* ganz besonders aufdrängen würde.“ (S. 539).

19 Vgl. hierzu Goldman (1991): „The judgement that engineering solutions ‘work’ is a social judgement, so that sociological factors must be brought directly into engineering epistemology and ontology. The fact that engineering practice entails action on a world also implies that the ontology of engineering can not be bracketed, so to speak.“ (S. 140). Goldman sieht aus diesen Gründen die Untersuchung von Technikwissenschaft als Herausforderung an traditionelle Metaphysik und Ontologie an. Ich folge zwar dieser Auffassung, würde sie jedoch auf neuzeitliche Naturwissenschaft ebenfalls anwenden wollen, da auch hier Weltveränderung immer mit involviert ist, so daß ontologische Aspekte nie „ausgeklammert“ werden können.

1.2 Gang der Untersuchung

Die hier vorliegende Untersuchung von Computersimulationen in der Technikentwicklung setzt ebenfalls an der Schnittstelle zwischen technischer und gesellschaftlicher Rationalität an. Allerdings steht mit den Techniken der Computersimulation kein spezielles technikwissenschaftliches Anwendungsgebiet, wie etwa die Kältetechnik, im Mittelpunkt. Vielmehr geht es um eine Methode, die an einer Vielzahl unterschiedlicher Technikentwicklungen beteiligt ist. Diese Methode wird jedoch als kognitive Praxis aufgefaßt, als ein Wissenswerkzeug also, das nicht allein als Anwendung theoretischer Prinzipien verstanden werden kann.

Das Wissenswerkzeug Computersimulation soll hier als eine Vermittlungsinstanz zwischen gesellschaftlichen und technischen Rationalitätsprinzipien beschrieben werden. Dabei möchte ich zeigen, daß die Durchführung von Computersimulation und die darauf basierende Entwicklung technischer Systeme ein Vorgang ist, in dem sich bestimmte technisch-gesellschaftliche Strukturen stabilisieren, während andere mögliche Formen des Zusammenwirkens technischer und gesellschaftlicher Zusammenhänge ausgeschlossen werden.

Diese These gilt zunächst für jedes Verfahren der Computersimulation. So läßt sich z. B. vermuten, daß der höhere Grad der Formalisierung, den jede Computersimulation mit sich bringt, eine bessere Verfügbarkeit über die behandelten Objekte und damit eine leichtere Mobilisierung von Ressourcen ermöglicht. Mit der steigenden Abstraktion vom konkreten Objekt könnte eine neue Qualität von Berechenbarkeit von Welt, wie sie von Hård als Ausdruck der von Max Weber beschriebenen kognitiven Rationalisierung interpretiert wird, erreicht sein. Mit der Vorhersagbarkeit und Kontrollierbarkeit hätte sich dann auch die Möglichkeit der Verwertung von Welt innerhalb bestehender ökonomischer Strukturen erhöht. Im Verlauf der Untersuchung muß jedoch für jedes einzelne Verfahren geprüft werden, ob und wie die Formalisierung von Weltausschnitten und die darauf basierende Technikentwicklung von gesellschaftlichen Strukturen geprägt sind und wie sie ihrerseits auf Formen der Techniknutzung und Implementierung zurückwirken. Dabei kann es durchaus sein, daß Phänomene zu beobachten sind, die der postulierten Gesamttendenz zuwiderlaufen. Gerade die Vielfältigkeit und Widerborstigkeit technischer Methoden, kann dazu dienen, die Kontingenz technikwissenschaftlicher Wirklichkeitsproduktion zu verdeutlichen und Wege für mögliche Alternativen aufzuweisen.

1.2 Gang der Untersuchung

Ein zentraler Bestandteil jeder Computersimulation ist die computergerechte Formalisierung der behandelten Weltausschnitte. Dieser Schritt wird als Modellierung oder Modellbildung bezeichnet. Die Entwicklung eines geeigneten Modellbegriffs ist daher für diese Arbeit von entscheidender Bedeutung. In Abschnitt 1.3 wird zunächst beschrieben, was Modelle kennzeichnet, die Computersimulationen zugrundeliegen. Anschließend wird ein Modellbegriff entwickelt, der es erlaubt, Modelle als Konstrukte zu begreifen, die gesellschaftliche und materielle Strukturen miteinander verknüpfen. In Abschnitt 1.4 werden Begriffe vorgestellt, mit denen die Modellierung im Sinne der ausgeführten Hintergrundannahmen als eine Praxis solcher Umordnungen soziotechnischer Strukturen analysiert werden kann. Es wird eine Parallele zwischen der Funktion des Computers für die Modellierung und der Rolle des „Labors“ in der modernen Naturwissenschaft gezogen. So wie das „Labor“ erzwingt auch der Com-

puter spezifische Umformungen der Untersuchungsgegenstände und kann daher als strukturierende Instanz in dem Prozeß der Erzeugung stabilen Wissens begriffen werden. In Abschnitt 1.4.2 wird ein Wissensbegriff eingeführt, der sich dazu eignet, Veränderungen in der Generierung technischen Wissens zu beschreiben. In Abschnitt 1.4.3 wird die schon erwähnte Finalisierungstheorie als Hintergrundkonzept für die Beschreibung der sozialen Einflüsse auf die praktische Nutzbarmachung naturwissenschaftlichen Wissens ausgeführt.

In Kapitel 2 werden nach einer näheren Einführung in die Thematik der technikwissenschaftlichen Computersimulation erste Thesen über die Zusammenhänge zwischen simulationsgestützter Wissensgenerierung und soziotechnischen Umstrukturierungen aufgestellt. Gleichzeitig werden Kategorien entwickelt, mit deren Hilfe diese Zusammenhänge analysiert werden können.

Den zentralen Teil der Untersuchung bildet die ausführliche Analyse dreier verschiedener Modellierungsverfahren in Kapitel 3. Die Verfahren werden hier unter Anwendung des entwickelten begrifflichen Instrumentariums als Abfolge vielfältiger Übersetzungsvorgänge beschrieben. Dabei wird die in Abschnitt 1.4 entwickelte These, daß das Zusammenwirken simulierter technischer Systeme mit ihrer physischen und sozialen Umgebung von dem in der Modellierung gesteckten Rahmen geprägt ist, an konkreten Beispielen simulationsgestützter Technikentwicklungen geprüft. Für jedes Verfahren wird entlang der in Kapitel 2 entwickelten Kategorien versucht, charakteristische Zusammenhänge zwischen Formalisierung von Welt und Eingriff in die Welt aufzuklären. Die tatsächliche Entwicklung technischer Artefakte ist jedoch nur ein Teil der postulierten Umordnung soziotechnischer Strukturen durch Computersimulationen. Auch über die Verbreitung der computergenerierten Visualisierungen der simulierten Vorgänge werden die im Verlauf der Modellierung entwickelten Objektordnungen in die „Welt“ zurücktransportiert. Solche Repräsentationen vermitteln bestimmte „Weltbilder“ weit über ingenieurwissenschaftliche Fachkreise hinaus an ein breites Publikum. Gleichzeitig wirken sie als wichtiges Arbeitsmittel praktizierender IngenieurInnen auf den Modus der Wissensgenerierung zurück. Diesem Aspekt der Welt-Bildung durch Visualisierungen von Computersimulationen wird in Kapitel 4 nachgegangen.

1.3 Ein Modellbegriff

Jede Computersimulation beruht, wie oben schon erwähnt wurde, auf einem Modell des untersuchten Weltausschnittes. Daher ist es für diese Untersuchung von zentraler Wichtigkeit, einen angemessenen Modellbegriff zu bestimmen. Dabei muß zweierlei geleistet werden. Zuerst geht es darum, aus der Vielzahl verschiedener Verwendungen des Begriffs „Modell“ diejenigen herauszustellen, die im Zusammenhang mit technikwissenschaftlicher Computersimulation gebraucht werden, da es notwendig ist, den Modellbegriff der beteiligten Akteure zu kennen, um die vorgestellten Verfahren und die herangezogenen Quellen verstehen zu können. Darüber hinaus ist es jedoch wichtig, den Begriff so zu erweitern, daß es möglich wird, ein Simulationsmodell im Sinne der oben entwickelten gesellschaftswissenschaftlichen Perspektive auf technische Methoden als eine hybride, soziotechnische Struktur zu begreifen.

1.3.1 Technische Begriffsbestimmungen

Simulation wird in den Ingenieurwissenschaften dazu eingesetzt, Aussagen darüber zu machen, wie sich ein System verhält, wenn es wechselnden Einwirkungen von außen ausgesetzt ist. Diese Aussagen können auf verschiedene Weisen für die Entwicklung und den Betrieb technischer Systeme genutzt werden.²⁰ Grundlage einer jeden Simulation ist die Nachbildung des Systems, dessen Verhalten simuliert werden soll, in einem geeigneten Arbeitsmedium, dem Simulator. Diese Nachbildung wird als Modellbildung oder Modellierung bezeichnet, während die Simulation selbst als das Experimentieren mit dem Modell aufgefaßt werden kann.²¹ So definiert der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) in der VDI-Richtlinie 3633:

„Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“.

Unter diesen Modellbegriff fallen auch physische Modelle wie z. B. verkleinerte Holzmodelle von Schiffsrümpfen, die zu Untersuchungen in Labortanks verwendet werden, oder maßstäblich verkleinerte Anlagenmodelle. Ebenso offen ist die Art des simulierten Systems. So werden neben kontinuierlich ablaufenden Prozessen auch diskrete Ereignisabfolgen (z. B. Produktionsabläufe) simuliert. Das Arbeitsmedium, in dem das Modell implementiert wird, ist bei einer Computersimulation ein Digitalrechner. Jeder Zusammenhang, der sich computergerecht formalisieren läßt, kann in ein Computersimulationsmodell eingearbeitet werden. Bei der Erstellung solcher Modelle sind grundsätzlich zwei Vorgehensweisen denkbar. Zum Einen kann versucht werden, die Wirkungsstruktur des Originalsystems in dem Modell nachzubilden. Dazu muß der

*„innerhalb des zu untersuchenden Systems sich vollziehende Prozeß der Wirkungsübertragung in rechnerisch faßbarer Form ausgedrückt werden“.*²²

Zum Anderen kann ein Modellsystem konstruiert werden, das – egal auf welche Weise – das Systemverhalten nachbildet. Ersterer Ansatz wird als White-Box Modellierung, die Verhaltensnachahmung als Black-Box Modellierung bezeichnet.²³ White-Box Modelle werden durch Deduktion aus den naturwissenschaftlich begründeten Gleichungen, die für das untersuchte Gebiet vorhanden sind, gewonnen. Die Modelle, die aus einer solchen naturwissenschaftlich-mathematischen Modellierung hervorgehen, werden hier als „analytische“ oder „fundamentale Modelle“ bezeichnet. Die in Abschnitt 3.4 ausführlich untersuchte Finite-Elemente-Methode (FEM) beruht auf solchen analytischen Modellen. Black-Box Modelle werden aus Messungen an einem konkreten System gewonnen. Sie liefern einen Zusammenhang zwischen den gemessenen Ein- und Ausgangsdaten ohne Kenntnis der zugrundeliegenden Gesetzmäßigkeiten. Dies kann zum Beispiel durch mathematische Beschreibung experimentell aufgezeichneter Kurven geschehen. Ein typisches Verfahren zur Produktion solcher

20 Einen Überblick über konkrete Einsatzweisen von Simulationstechniken gibt Abschnitt 2.2.

21 Vgl. Rohrlach (1990), Humphreys (1990) oder Roth (1992).

22 Profos (1982, S. 12).

23 Isermann (1997) unterscheidet diverse Zwischenstufen wie Light/Dark/Grey-Box etc. und ordnet den Stufen die gängigen ingenieurwissenschaftlichen Modellierungsansätze zu. Jäger (1992, S. 49) bezeichnet die Beseitigung von Black-Box Modellen und ihren Ersatz durch Modelle, die auf Fundamentaltheorie beruhen, als Ziel wissenschaftlicher Forschung überhaupt.

„schwarzer“ Systemmodelle ist die in Abschnitt 3.6 vorgestellte konnektionistische Modellierung. Die in Abschnitt 3.5 untersuchte Fuzzy-Modellierung läßt sich demgegenüber aus Gründen, die dort genannt werden, nicht eindeutig einer der Kategorien zuordnen. Für die genannten Verfahren spielt der Computer als Hilfsmittel eine sehr unterschiedliche Rolle. Analytische Modelle wurden in den Natur- und Technikwissenschaften schon immer verwendet, ohne daß Digitalrechner bei ihrer Generierung und Auswertung von Bedeutung waren. Die Implementation solcher Modelle in dem Computer ermöglicht jedoch die Anwendung numerischer Verfahren zur Lösung von Gleichungssystemen, die sich bisher der Analyse entzogen. Konnektionismus und Fuzzy-Logik sind dagegen Verfahren, die für ihre Anwendung von vornherein auf Computertechnik angewiesen sind.

In dieser Untersuchung soll jede Beschreibung eines Zusammenhanges zwischen Größen eines Systems, die sich in eine computergerechte Form bringen läßt, als „mathematisches Modell“ bezeichnet werden. In diesem Sinne können alle Modelle, die mit den hier behandelten Verfahren erstellt werden, als mathematische Modelle bezeichnet werden. Ein wichtiger Aspekt ist es dabei, daß ein Modell – im Gegensatz zu einer Theorie, die allgemeine Aussagen über ein Wissensgebiet macht – ein konkretes Objekt aus diesem Gebiet beschreibt. Mathematische Modelle, wie sie oben eingeführt wurden, beschreiben stets einen umgrenzten Ausschnitt aus der Wirklichkeit, wie etwa die Strömung in einem bestimmten Rohr oder die Wärmeverteilung innerhalb eines Bauteils. Jedes Modellierungsverfahren beinhaltet spezifische Vorgehensweisen zur Vermittlung zwischen solchen lokalen Einzelphänomenen und formalen Strukturen mit universeller Ausrichtung.

In diesem Abschnitt wurde der Modellbegriff in pragmatischer Weise ausgehend von dem Gegenstand der Untersuchung, der technikwissenschaftlichen Computersimulation, bestimmt. Der Begriff „Modell“ ist jedoch für die Naturwissenschaften und auch innerhalb der Wissenschaftstheorie von zentraler Bedeutung und wird auf sehr verschiedene Weisen verwendet und interpretiert. Einige Aspekte dieser Verwendungsweisen werden hier ausgeführt, um daran anschließend einen eigenen Modellbegriff entwickeln zu können.

1.3.2 Der Modellbegriff in den Naturwissenschaften

Umgangssprachlich impliziert der Begriff des Modells eine vereinfachte Beschreibung eines Sachverhaltes. In diesem Sinne wird auch in den meisten Naturwissenschaften die Bezeichnung „Modell“ für Beschreibungen der Wirklichkeit verwendet, in denen einige Aspekte bewußt vernachlässigt wurden. Aus der Sicht einer realistischen Auffassung von wissenschaftlicher Naturbeschreibung lassen sich die im Zuge solcher Idealisierungen weggelassenen Effekte bei Bedarf zu dem Modell hinzufügen, so daß die Realität durch verfeinerte Modelle immer besser erfaßt wird. Weiterhin werden mathematische Beschreibungen physikalischer Phänomene oft dann als Modelle bezeichnet, wenn die ursprünglichen Gleichungen mathematisch vereinfacht werden, da eine exakte Lösung der Grundgleichung unter den gegebenen Randbedingungen nicht verfügbar ist. Modelle sind in diesem Sinne als Approximationen der Grundlagentheorie zu verstehen. Beide Verwendungsweisen des Modellbegriffs sind in Bezug auf analytische Modelle auch in den Ingenieurwissenschaften üblich.

Eine spezielle Verwendung erfährt das „Modell“ in der Mathematik. Hier bezeichnet man einzelne konkrete Ausprägungen einer formalen Struktur als „Modelle“ dieser

Struktur. So wird z. B. der dreidimensionale euklidische Raum als ein „Modell“ des allgemeinen metrischen Raumes aufgefaßt und die natürlichen Zahlen werden als „Modell“ der Peano-Axiome aufgefaßt.²⁴

Eine weitere Bedeutung des Begriffs ist angesprochen, wenn von „Analogiemodellen“ die Rede ist. Hier geht es darum, Probleme eines Fachgebiets in Analogie zu Ansätzen aus einem anderen Bereich zu lösen. Das Modell dient hier nicht als Beschreibung der Wirklichkeit, sondern als Hilfsrahmen zur Überprüfung der Konsistenz von Theorien.²⁵ Auch dieser Modellbegriff hat in den Ingenieurwissenschaften eine gewisse Tradition. So gab es schon früh Bestrebungen, verschiedene technisch relevante Fachgebiete in Analogie zu den Elementen elektrotechnischer Schaltkreise zu interpretieren.²⁶

Bei der Kennzeichnung der von den Naturwissenschaften entwickelten mathematischen Modelle wird häufig zwischen phänomenologischen und fundamentalen Modellen unterschieden.²⁷ Letztere werden als Anwendung fundamentaler naturwissenschaftlicher Theorie auf konkrete Phänomene verstanden. Phänomenologische Modelle dagegen beschreiben zwar einen beobachteten Zusammenhang, liefern aber keine Erklärung. Sie entstehen empirisch und sind unabhängig von Grundlagentheorie. Eine ähnliche Kategorisierung nimmt die oben eingeführte Unterscheidung zwischen Black- und White-Box Modellen vor, wie sie in den Ingenieurwissenschaften üblich ist. Hartmann (1996) definiert ein Modell als „Menge von Annahmen über ein System“, wobei die Annahmen sowohl phänomenologischer als auch fundamental-theoretischer Herkunft sein können. Entscheidend ist für ihn, daß ein Modell im Gegensatz zu der Theorie, die allgemeine Prinzipien angibt, ein konkretes System beschreibt, wie es schon oben für das hier zu verwendende „mathematische Modell“ hervorgehoben wurde.

1.3.3 Modelle zwischen Theorie und Welt - Der Modellbegriff in der Wissenschaftstheorie

Eine klassische Betrachtungsweise der Funktion von Modellen im Prozeß menschlicher Erkenntnisgewinnung über die Natur entwickelt Heinrich Hertz (1894) in seiner Einleitung zu den „Prinzipien der Mechanik“:

„Wir machen uns innere Scheinbilder oder Symbole der äußeren Gegenstände, und zwar machen wir sie von solcher Art, daß die denknotwendigen Folgen der Bilder stets wieder die Bilder seien von den naturnotwendigen Folgen der abgebildeten Gegenstände“ (S. 1)

Aus den Bildern können nach Hertz zwar Folgerungen über das Verhalten der äußeren Welt gezogen werden, daß aber darüber hinaus Übereinstimmung mit den Dingen besteht, ist nicht gewährleistet:

„Lassen wir allgemein und ohne Einschränkung zu, daßs außer den unmittelbar, d. h. den mit der Wage bestimmbaren Massen noch andere, hypothetische Massen in den

24 Vgl. Hinderer (1992, S. 25) und Wolters (1995, S. 911).

25 Vgl. Wolters (1995, S. 912).

26 Diese Versuche gewinnen im Zuge der Einführung von Computersimulation an praktischer Relevanz, da sie für die verschiedenen Fachgebiete eine einheitliche Form und Vorgehensweise bei der Modellierung ermöglichen (vgl. hierzu Isermann (1997) und auch die anderen Beiträge des Tagungsbandes).

27 So Humphreys (1990, S. 503) und Rohrlich (1990, S. 508/S. 512).

Systemen der Natur sich finden können, so ist es überhaupt unmöglich, in der Erkenntnis des Zusammenhanges natürlicher Systeme weiter zu gelangen als soweit, daßs man Modelle der wirklichen Systeme angeben könne. Wir können dann in der That keine Kenntnis haben, ob die Systeme, welche wir in der Mechanik betrachten, mit den wirklichen Systemen der Natur, welche wir zu betrachten meinen, in irgend etwas anderem übereinstimmen als allein darin, daßs die einen Modelle der anderen sind.“ (ebd., Abschnitt 427, S. 199)

Nach Hertz kann es durchaus verschiedene Bilder für ein- und denselben Gegenstand geben. Kriterien für die Auswahl von Bildern sind die logische Konsistenz (Zulässigkeit), die Übereinstimmung der aus den Bildern abgeleiteten Prognosen mit der Realität (Richtigkeit), die Deutlichkeit, d.h. die Anzahl der in dem Bild enthaltenen wesentlichen Beziehungen des Gegenstandes und die Einfachheit (Zweckmäßigkeit). Letztere ist dabei Gegenstand von Meinungsverschiedenheiten und historischem Wandel.²⁸ Auf die von Hertz gelieferte Interpretation naturwissenschaftlicher Weltbeschreibung beziehen sich auch heutige Bestimmungen des Modellbegriffs. So definiert der Mathematiker Willi Jäger (1992) mit Bezug auf Hertz:

„mathematische Modelle sind Abbildungen von Teilen der Natur in formale Systeme.“ (S. 80)

Dabei ist in einer solchen Interpretation nicht unbedingt eine Bewertung der epistemologischen Stellung einer solchen Modellkonstruktion enthalten. Entscheidend ist lediglich die von Hertz angegebene Grundbedingung der Strukturtreue zwischen Urbild und Abbild, welche die Anwendbarkeit der Modellaussagen in der Welt garantiert.²⁹ Darüberhinaus sind jedoch verschiedene Auffassungen möglich, wie Modelle und naturwissenschaftliche Grundagentheorie zusammenhängen und auf welche Weise anwendbare Modelle zustandekommen. Eng verknüpft mit dieser Fragestellung sind die Differenzen zwischen verschiedenen Standpunkten zu dem Wahrheitsanspruch wissenschaftlicher Weltbeschreibung. Diesen Verknüpfungen kann hier nicht ausführlich nachgegangen werden. Dennoch sollen die Fragen, die sich gerade in Bezug auf den Modellbegriff stellen, zumindestens angerissen werden.

Eine Konzeptualisierung der Funktion von Modellen, die über die Auffassung, abstrakte Theorien seien durch Brückenprinzipien mit der Welt verbunden, hinausgeht, liefert die semantische Auffassung von Wissenschaft.³⁰ Hier kennzeichnet ein Modell die von einer Theorie beschriebenen Objekte und Systeme. Das Modell gibt die Größen an, die für die Anwendbarkeit der Theorie gegeben sein müssen. Eine Theorie ist aus dieser Sicht eine Familie von Modellen. So kann die Newtonsche Mechanik als Menge aller Modelle aufgefaßt werden, die für ein System die Bewegungsgleichungen und die Anregungsfunktion angeben.³¹ Darüberhinaus gehören jedoch auch Beispiele für erfolgreiche Anwendungen der Modelle zu einer Theorie. Modelle sind auch nach der semantischen Theorieauffassung stets idealisierte Gebilde. Gerade diese Idealisierung ermöglicht es, daß ein einziges Modell für verschiedene Anwendungsfälle herangezogen werden kann. Der jeweilige Einzelfall

28 Vgl. Hertz (1894, S. 3).

29 Hertz selber stellt die These auf, daß das Zutreffen dieser Bedingung in einer Übereinstimmung zwischen der Natur und unserem Geiste begründet ist (ebd., S. 1).

30 Vgl. Carrier (1996).

31 Vgl. Morrison (1998, S. 66).

wird dann durch Angabe der entsprechenden Parameter und Randbedingungen erfaßt. Modelle sind nach dieser Auffassung damit sowohl Bestandteile der Grundlagentheorie als auch Hilfsmittel zur Beschreibung von Phänomenen, wie sie in der Welt auftreten.

Andere wissenschaftstheoretische Ansätze postulieren eine Vielzahl möglicher Verhältnisse zwischen Fundamentaltheorie, Modellen und realen Phänomenen. So vertritt z. B. Nancy Cartwright (1983 und 1999) die Auffassung, daß naturwissenschaftliche Grundlagentheorie nur auf eine sehr begrenzte Menge von idealen Objekten angewendet werden kann. Solche Objekte müssen ihr zufolge durch kunstvolle Zurichtungen und Abschirmungen hergestellt werden.³² Um „repräsentative Modelle“ zu erhalten, die reale Ereignisse beschreiben können, muß nach Cartwright weit über die Theorie hinaus gegangen werden. Im Gegensatz zu klassischen Auffassungen, nach denen eine wissenschaftliche Theorie die Brückenprinzipien zur Welt in sich enthält, vertritt Cartwright die Ansicht, daß naturwissenschaftliche Fundamentaltheorie von sich aus keine Hinweise auf die Wege zur Konstruktion repräsentativer Modelle gibt. Im Gegenteil weist sie darauf hin, daß Modellkorrekturen, die in der wissenschaftlichen Praxis vorgenommen werden, um reale Vorgänge zu beschreiben, in vielen Fällen mit der Fundamentaltheorie inkonsistent sind. Häufig sind es ihr zufolge gerade erfahrungsbasierte Näherungen, wie sie in den Ingenieurwissenschaften eine große Rolle spielen, die auf diese Weise zur Realität hinführen.³³

Ian Hacking (1983) betont in seiner Analyse wissenschaftlicher Forschung die Bedeutung praktischer „Intervention“ in die Welt durch das Experiment. Er weist darauf hin, daß es in der neuzeitlichen Wissenschaft in hohem Maße von technischen Apparaten, aber auch von Techniken der Wissensgewinnung bestimmt ist, welche Phänomene stabil erzeugt und manipuliert werden können. Entsprechend beschreibt Hacking ein kompliziertes Zusammenspiel verschiedener Bestandteile von Theorie und Beobachtung zur Erzeugung stabilen Wissens. Dabei spielt die Produktion von Modellen eine wichtige Rolle indem sie zwischen „Spekulation“, „Kalkulation“ und „Experimentieren“ vermittelt.³⁴

Die epistemologische Bewertung der Modellierung wird in wissenschaftstheoretischer Hinsicht relevant, da sie darüber entscheidet, wie das Verhältnis zwischen der zu beschreibenden Welt und den sie abbildenden formalen Strukturen gedacht wird. Für diese Arbeit möchte ich an die Überlegungen von Hacking anknüpfen, wonach die naturwissenschaftliche Grundlagentheorie von sich aus keine Hinweise darauf liefert, wie die ungeheure Komplexität beobachteter Phänomene geordnet werden soll und welche Theorierichtung für welche Art von Phänomenklassen über Modelle handhabbar gemacht werden kann. Die Zerlegung komplexer Ereignisse in Einzelphänomene und die Isolierung von beschreibbaren Effekten ist demnach eine spezifisch menschliche Verfahrensweise mit einem kontingenten Verlauf. Zwar lassen sich materielle Strukturen nicht mit beliebigen Formalisierungen so fassen, daß sie erfolgreich umgeformt werden können und setzen ihrer zweckgerichteten Konzeptualisierung Widerstände entgegen. Stets sind jedoch mehrere Möglichkeiten für „robuste

32 Vgl. Cartwright (1999, S. 254).

33 Vgl. Cartwright (1983) vor allem die Kapitel 3 und 6.

34 Vgl. Hacking (1983, S.210ff.). Später differenziert Hacking (1992) dieses Konzept noch weiter und unterscheidet insgesamt fünfzehn verschiedene Ebenen wissenschaftlicher Erkenntnisproduktion.

Fugungen“ zwischen „Theorie, Phänomenologie, schematischem Modell und Geräten“ möglich.³⁵ In dem Moment, wo naturwissenschaftliche Grundlagentheorie auf konkrete Phänomene angewendet wird, sind daher immer menschliche Zurichtungen und damit kulturelle und soziale Einflüsse im Spiel. Die Konstruktion mathematischer Modelle, wie sie hier untersucht werden, beinhaltet stets solche Akte der Abgrenzung und Aufteilung. Dies gilt auch dann, wenn Modellierung nicht auf die klassische naturwissenschaftlich basierte Analyse zurückgreift, sondern induktiv vorgeht, wie dies bei den Black-Box Verfahren der Fall ist. Modellierung ist daher von vornherein mit einer Intervention in die Welt verbunden und läßt sich nicht von den Zwecken, die mit ihr verfolgt werden, trennen.³⁶ Bei technikwissenschaftlichen Modellierungen, die im Rahmen industrieller Technikentwicklung stattfinden, muß die ökonomische Verwertung der Modellierungsergebnisse als primärer Zweck angesehen werden.³⁷ Dabei steht nicht unbedingt der direkte Profit aus dem Verkauf der auf Modellierung beruhenden technischen Artefakte im Vordergrund. Auch Kostenreduktionen, die man sich verspricht, wenn auf der Basis von Modellen der Betrieb technischer Systeme automatisiert wird, spielen eine große Rolle. In diesen Fällen sind z. B. eine erhöhte Unabhängigkeit von menschlichem Wissen oder eine verbesserte Kontrolle über die Produktionsabläufe ökonomisch motivierte Ziele von Modellierungen. Die Passung zwischen Abstraktion und Realität, zwischen Welt und Modell muß dabei in der Praxis immer wieder neu durch einen erheblichen Einsatz von Zurichtungsarbeit vollzogen werden. Um diese Strategien zu untersuchen, reicht es nicht, lediglich auf die strukturellen Analogien zwischen technikwissenschaftlicher Formalisierung und gesellschaftlichen Ordnungen hinzuweisen. Wie es hier schon in der Einleitung gefordert wurde, müssen Begriffe verwendet werden, die es erlauben, die kulturelle und gesellschaftliche Bedingtheit technikwissenschaftlicher Methoden zu analysieren. Diesem Anspruch muß bei dieser Untersuchung von Computersimulation vor allem der verwendete Modellbegriff gerecht werden, indem er zugleich die gesellschaftliche Funktion als auch den epistemologischen Status von Modellen einbezieht.

Einen Ansatz zur Entwicklung eines Modellbegriffs, an den in dieser Hinsicht m.E. fruchtbar angeknüpft werden kann, macht Margaret Morrison.³⁸ Sie richtet ihren

35 Siehe Hacking (1999, S. 113 und 114). Vgl. auch ders. (1992, S. 31).

36 Zu einem ähnlichen Schluß kommt auch der Informatiker Wolfgang Hinderer (1992), der die Modellierungsfrage aus der Sicht der Informatik verfolgt: „Der Raum möglicher in das formale Modell hinüberzurettender struktureller Eigenschaften eines realen Systems besitzt sicherlich unendlich viele Dimensionen und ist einer geschlossenen Beschreibung prinzipiell nicht zugänglich. [...] Die Richtung der Zuordnung zwischen formalem Modell und realem System muß **vom formalen Modell zum realen System** gehen.“ (S. 26, Hervorhebung im Original).

37 Dies gilt gerade auch für solche Modellierungen, die ohne konkrete technische Anwendung vorgenommen werden. Gerade die „Zweckfreiheit“ bedeutet theoretisch eine universelle Einsetzbarkeit, die als Zweck an sich betrachtet werden kann. Das Abzielen von Formalisierungen auf eine solche allgemeine Verfügbarkeit kann als typisch für die kapitalistische Produktionsweise betrachtet werden. Dabei lassen sich formalisierte Strukturen umso besser in verschiedene Verwertungskontexte einbinden, je weniger sie noch Spuren ihrer Bezüge zu konkreten einzigartigen Phänomenen in sich tragen. Ullrich (1988, S.103 ff.) spricht von einer „offenen Zweckstruktur“ naturwissenschaftlich-industrieller Technik in kapitalistischen Wirtschaftsstrukturen. Auch Wenzel (1996) betont in seiner an die Arbeiten der kritischen Theorie anschließenden Analyse wissenschaftlich technischer Methodik die Gesellschaftlichkeit von Zweckoffenheit: „Der Zweck der universellen Berechenbarkeit wird konstituiert von der herrschenden Vergesellschaftungsform, und diese ist nach wie vor modelliert nach den Erfordernissen der Verwertung des Wertes, dem weiterhin bestimmenden Kernprozeß der gesellschaftlichen Produktion“ (S.189).

38 Siehe Morrison (1998 und 1999) sowie Morrison und Morgan (1999).

Blick auf die Funktion von Modellen im Prozeß der Wissensgewinnung und Technologieentwicklung. Dabei wendet sie sich ähnlich wie Cartwright gegen die enge Verknüpfung zwischen Modell und Theorie, wie ihn die semantische Auffassung vertritt, und gegen die Vorstellung, Modelle bestünden lediglich aus mathematisch motivierten Approximationen der Grundlagentheorie. Morrison geht in ihren Überlegungen weit über diese formalen Charakterisierungen von Modellen hinaus und spricht Modellen eine eigenständige Funktion als Mittler zwischen Technologie, Theorie und den tatsächlichen Phänomenen zu. Unabhängig davon, ob diese eng mit naturwissenschaftlicher Grundlagentheorie verwoben sind oder mehr empirische Elemente aufweisen, fungieren sie als „autonome Agenten“³⁹ bei der Gewinnung von Wissen über Welt. Im Gegensatz zu Cartwright (1983) mißt Morrison der Unterscheidung zwischen phänomenologischen und fundamentalen Modellen oder Modellanteilen nur eine untergeordnete Bedeutung zu. Zwar unterscheiden sich für sie hier die Formen der Repräsentation, der autonome Charakter ist jedoch jeder Modellform zueigen.⁴⁰ Selbst solche Modelle, die sich sehr eng an die Grundlagentheorie anlehnen, wie etwa das physikalische Pendel, kommen, so Morrison, nicht ohne empirisch gewonnenes Wissen aus, wenn sie tatsächlich zur Intervention in reale Zusammenhänge genutzt werden sollen. Gerade diese doppelte Verankerung in Theorie und Experiment verleiht den Modellen ihre Eigenständigkeit und befähigt sie, in beiden Sphären zu agieren. Häufig ist – Morrison zufolge – eine akkurate Repräsentation des zugrundeliegenden Phänomens bei der Modellierung gar nicht intendiert. So weist sie darauf hin, daß in vielen Bereichen (z. B. bei der Beschreibung des Atomkerns) mehrere zueinander inkompatible Modelle eines Phänomens verwendet werden, die aber jeweils eine Funktion bei der Verwirklichung einer bestimmten Technologie erfüllen. Ausschlaggebend für den Erfolg des Modells ist hier die Einsetzbarkeit als Instrument bei dem gezielten Eingriff in die Welt.⁴¹ Gleichzeitig setzt sich Morrison von der instrumentalistischen Auffassung ab, nach der ein Modell lediglich der Vorhersage diene und keinerlei Repräsentationsfähigkeit aufweise. Nach Morrison liefert ein Modell sehr wohl repräsentative Informationen und zwar solche über das Funktionieren von Prozessen realer Welt. Morrison hebt hervor, daß häufig durch die Bemühungen um funktionierende Modellinstrumente ein fruchtbarer Lernvorgang über die zu beschreibenden Zusammenhänge angestoßen wird.⁴² Im Gegensatz zu rein formalen Beschreibungen enthalten Modelle ihr zufolge Wissen über die Möglichkeiten der Herstellbarkeit und Aufzeichnung von Zusammenhängen etwa im Labor oder innerhalb bestimmter technologischer Kontexte und repräsentieren auf diese Weise Ausschnitte von Welt. Diese Form der Repräsentation ist möglich, da ein Modell relevante strukturelle Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Elementen eines Systems wie-

39 Morrison (1999, S. 38).

40 „The important lesson here is that the descriptive accuracy with which models represent physical systems is not simply a function of whether the model is theoretical or phenomenological. Nor does that distinction indicate a reliance on or independence from theory. To that extent the contrast between theoretical and phenomenological models, although important for recognising particular aspects of model construction, ceases to have philosophical importance as a way of isolating realistic models from those that are more abstract.“ (Morrison 1999, S. 63). Cartwright selber modifiziert später (1999, S. 242) ihre frühere Einteilung und unterscheidet dort lieber zwischen „repräsentativen“ und „interpretativen“ Modellen.

41 „We do not assess each model based on its ability to accurately mirror the system, rather the legitimacy of each different representation is a function of the model's performance in specific contexts“ (Morrison 1999, S.28).

42 Vgl. Morrison/Morgan (1999, S. 30 f.).

dergibt. Dadurch kann es das Verhalten der modellierten Systeme in gewissen Grenzen vorhersagen und erklären, ohne jedoch in qualitativer Hinsicht die „Realität“ zu spiegeln. Damit ähnelt Morrisons epistemologische Einordnung von Modellen dem oben diskutierten Standpunkt von Heinrich Hertz, nach dem keine Sicherheit darüber bestehen kann, ob über die Vorhersagefunktion hinaus eine Übereinstimmung zwischen dem Abbild/Modell und dem Urbild/Natur besteht. Für Morrison entscheidet nicht die optimale Abbildung der Phänomene durch das Modell, sondern seine Funktion als Instrument bei dem Eingriff in die Welt über seinen Erfolg. Daher müssen andere als rein theorieimmanente Kriterien für den Einsatz bestimmter Modell-Instrumente ausschlaggebend sein. Morrison ermöglicht es somit mit ihrem Begriff von Modellen als „Instrumenten zur Intervention in die Welt“ den Blick weg von den mit dem Modellbegriff verbundenen epistemologischen Fragen und hin zu der gesellschaftlichen Dimension von Modellierung zu richten. Mit dem Modellbegriff von Morrison wird es möglich, Modellierung als Praxis, mit der materielle Anteile eines Dispositivs menschlicher Denk- und Handlungsweisen generiert werden, zu konzeptualisieren. Eine solche Wendung der Perspektive ist für diese Untersuchung in hohem Maße sinnvoll. Denn für die hier beabsichtigte Analyse der Rolle von Modellbildungen und Simulationen in der Technologieentwicklung ist es nicht entscheidend, was durch Modelle abgebildet wird und ob damit Strukturen von Welt erfaßt werden, die unabhängig von den Eingriffen menschlicher Beobachtung existieren. Mir kommt es darauf an, daß durch die modellbasierte Technikentwicklung wirkmächtige materiell-soziale Strukturen *geschaffen* werden. Gerade die Verknüpfung materieller und sozialer Elemente macht die „Realität“ solcher Strukturen aus. Entscheidend an einem Instrument ist, daß es Wirklichkeit schafft, und nicht die Frage, ob es Wirklichkeit abbildet.⁴³

1.4 Modellierung als gesellschaftliche Praxis

1.4.1 Modellierung als Umordnung - Einführung einiger Analysebegriffe

Mit der im vorigen Abschnitt vollzogenen Wendung von wissenschaftstheoretischen Fragen nach dem „Wahrheitsgehalt“ von Modellen hin zu ihrer Funktion in der Praxis der Produktion gesellschaftlicher Wirklichkeit öffnet sich die Perspektive dieser Arbeit hin zu den Untersuchungen von Wissenschaft und Technik, wie sie in dem Umfeld der „Science and Technology Studies“ stattfinden. Zwar lassen sich diese Forschungen hinsichtlich ihres wissenschaftstheoretischen Hintergrundes nicht über

43 Eine ähnliche Wendung kann in der Debatte um die Frage nach der Formalisierbarkeit menschlicher Tätigkeiten beobachtet werden. So betont Bettina Heintz (1993), daß es für eine soziologische Untersuchung des Phänomens der „Künstlichen Intelligenz“ auf die der Formalisierung vorangehenden Umformungen dieser Tätigkeiten und damit auf die Produktion von formalisierbarer Realität ankommt: „Ohne die tiefgreifende Umstrukturierung von Handlungsfeldern unter der Maxime der Regelmäßigkeit und Berechenbarkeit wäre nicht ein breites Spektrum menschlichen Handelns so weit normiert worden, daß seine maschinelle Imitation problemlos möglich wurde.“ (ebd. S. 299).

In neueren Ansätzen aus der Informatik selbst läßt sich ebenfalls eine Abkehr von der Sicht auf Modellierung als einer von der Realität ausgehender Abbildungstechnik hin zu einer wirklichkeitskonstituierenden Praxis beobachten. So entwickelt die Informatikerin Christiane Floyd (1992) eine Sicht auf Software-Entwicklung, die sie selbst als „Software Development as design“ bezeichnet. Floyd schreibt (S.93): „Design thus links different worlds: the social world of the application in question, the technical world of the means of application, and the formal world of methods and concepts“.

einen Kamm scheren, den meisten dieser Studien ist jedoch gemeinsam, daß sie sich weniger für die prinzipiellen Fragen nach der Natur menschlicher Erkenntnis von Welt als vielmehr für die vielen kleinen Techniken interessieren, die naturwissenschaftlich technischer Wissensproduktion zu ihrer großen Wirkmächtigkeit verhelfen. Um einen begrifflichen Rahmen für die Beschreibung der Modellierung als gesellschaftlicher Praxis zu entwickeln, werde ich daher einige Begriffe aus diesem Forschungsfeld verwenden.

Der Computer als Labor

Zunächst möchte ich eine Parallele zwischen dem Computer in seiner Funktion für Simulationen und dem naturwissenschaftlichen Labor im Sinne der sogenannten „Laborstudien“⁴⁴ ziehen. In einem Labor werden herausgetrennte Stücke von Welt in einer eigens hergerichteten Umgebung unter künstlichen Bedingungen untersucht. Diese Form der Untersuchung von Natur ist typisch für die modernen Naturwissenschaften. Die Laborstudien haben sich besonders eingehend mit den Vorgängen in Laboren auseinandergesetzt.⁴⁵ Entscheidend ist es dabei, daß bei dem Transfer in das Labor soziale und natürliche Ordnung verschmelzen und gemeinsam verändert werden. Der Vergleich zwischen dem Computer und dem Labor ist schon allein deswegen plausibel, weil auch von Seiten der Simulationsanwender selbst immer häufiger Begriffe wie „numerisches Experiment“⁴⁶ oder „numerischer Empirismus“⁴⁷ im Zusammenhang mit Computersimulationen verwendet werden.⁴⁸ So heißt es in der „Encyclopædia of Computer Science“:

„The purpose of simulation is usually to make experimental measurements or predict behaviour; thus moving the laboratory into the computer environment“. (Roth (1992, S. 1204 Hervorhebung P.W.)

Dieser Transfer des Labors in den Computer läßt sich analog zu dem Transport der Welt in das Labor analysieren. Sind es im klassischen Labor die Instrumente, die für die untersuchten Gegenstände sprechen, so sind es in einer Computersimulation programmierte Algorithmen, die – häufig vermittelt über Visualisierungstechniken – Auskunft über die Dinge geben. Zwar finden innerhalb des Computers keine sozialen Interaktionen zwischen Akteuren statt, wie sie für das technowissenschaftliche Labor typisch sind. Der Vergleich im Hinblick auf die Funktion als Vermittlungsinstanz zwischen einer unbestimmten Umgebung und deren strukturierten Beschreibung und Verwertung ist jedoch meiner Auffassung nach gewinnbringend. Die Übersetzung von Weltausschnitten in das Computerlabor und die Interpretation der dabei erzeugten Visualisierungen ist ebenso Gegenstand von Aushandlungsprozessen wie die Gültigkeit von Fakten, die im technowissenschaftlichen Labor produziert werden. Karin Knorr Cetina hat sich ausführlich damit auseinandergesetzt, welchen epistemologi-

44 Die „Laboratory Studies“ bilden eine spezielle Forschungsrichtung Ansatz innerhalb des STS Feldes, die sich vor allem mit dem naturwissenschaftlichen Labor als Ort der Produktion von Erkenntnis auseinandersetzt. Die Entwicklung und die zentralen Konzepte beschreibt Karin Knorr Cetina (1995).

45 Das Phänomen der Zurichtung von Natur in neuzeitlicher Wissenschaft ist selbstverständlich nicht erst von den sozialkonstruktivistischen Ansätzen entdeckt worden. Vgl. hierzu z. B. (Böhme 1992a und 1992b). Allerdings wurde in den Laborstudien erstmals das konkrete Geschehen innerhalb wissenschaftlicher Labore detailliert beschrieben und analysiert.

46 Humphreys (1990, S. 502), Rohrlich (1990, S. 511/S. 514).

47 Humphreys (1995/96).

48 Zur Frage nach der Berechtigung dieser Bezeichnung vgl. Abschnitt 3.4.15 auf Seite 99.

schen Gewinn der Transfer der Welt in das Labor für die Wissenschaft bedeutet. In einer Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Laborstudien nennt sie drei wesentliche Faktoren:

*„there are at least three features of natural objects that a laboratory science does not need to accomodate: First, it does not need to put up with the object **as it is**; it can substitute all of its less literal or partial versions, as illustrated above. Second, it does not need to accomodate the natural object **where it is**, anchored in its natural environment. Laboratory sciences bring objects ‘home’ and manipulate them ‘on their own terms’ in the laboratory. Third a laboratory science does not need to accomodate an event **when it happens**; it does not need to put up with natural cycles of occurrence but can try to make them happen frequently enough for continuous study.“* (Knorr Cetina 1995, S. 145/146, Hervorhebungen im Original)

In dieser Arbeit soll in analoger Weise gefragt werden, wie das Computerlabor die Wirkmächtigkeit technikwissenschaftlichen Wissens erhöht. Dabei läßt sich schon auf den ersten Blick vermuten, daß sich einige der von Knorr Cetina angeführten Effekte in ähnlicher Weise bei der Überführung von Weltbeschreibungen in den Computer einstellen. Ist ein Modell einmal in einem Computer implementiert, können beliebige Ereignisse damit simuliert werden, ohne daß es der vielen aufwendigen Zurichtungen des klassischen Laborexperimentes bedarf. Es können sogar Vorgänge simuliert werden, die sich in einem klassischen Experiment gar nicht realisieren lassen würden. Die Simulationen können beliebig oft unter verschiedenen oder gleichen Bedingungen an immer neuen Orten wiederholt werden. Dies bedeutet eine vielfache Potenzierung des Labor-Effektes.

Rekonfiguration und Übersetzung

Knorr Cetina verwendet den Begriff „Rekonfiguration“, um die Umordnung der Dinge in eine neue sozial-materielle Ordnung innerhalb des Labors zu beschreiben. Daran werde ich anschließen und die Rekonfiguration als Analysekategorie für die Praxis der Modellierung verwenden. Im Computer-Labor werden die Dinge spezifischen Rekonfigurationen unterworfen, die sich von denen des klassischen Experiments unterscheiden. Darunter fällt vor allem die Heraustrennung von Bereichen aus ihrer Umgebung (Dekontextualisierung), die Bildung von Grenzen zwischen diskreten Objekten und die Ordnung verschiedener Phänomene nach bestimmten Merkmalen. In dem fertigen Simulationsmodell sind die gesellschaftlichen und materiellen Elemente, die im Verlauf der Modellierung aus ihren Kontexten herausgegriffen wurden, zu einer neuen Struktur geronnen. Diese Struktur gewinnt eine eigene Wirklichkeit, sie ermöglicht spezifische Zugriffe auf die beschriebenen Zusammenhänge und schafft damit eine neue soziotechnische Ordnung.⁴⁹

49 Rudi Schmiede (1996, S.31) beschreibt diesen Vorgang mit Blick auf die Formalisierung von Arbeitsabläufen folgendermaßen: „Charakteristisch für die Abstraktion von materieller Realität, die mit der Formulierung von Algorithmen als rein symbolischen Zeichenketten und Operationen vollzogen wird, ist die Konstruktion eines formalen Modells dieser Realität als neuer eigenständiger Wirklichkeit. [...] . Wir haben es mithin mit einer strukturellen Verdopplung von Realität zu tun: Neben und über die konkrete Realität tritt die zweite des formalen Systems, das von der ersten abstrahiert wurde; gleichwohl ist diese zweite Realität nicht weniger wirklich als die erste, denn sie ist als reine Form unabhängig von der ersten existenzfähig und verändernden Operationen zugänglich.“

Um die Aktivität zu kennzeichnen, die aufgewendet wird, um die Rekonfigurationen durchzuführen, werde ich von „Übersetzung“ sprechen. Dieser Begriff ist besonders ausführlich und in einem sehr weiten Sinne von Bruno Latour in „Science in Action“ (1987) verwendet worden.⁵⁰ Latour kennzeichnet damit die Überführung der unterschiedlichsten (heterogenen) Elemente aus ihren Kontexten heraus in einen einheitlichen Rahmen (Netzwerk). Wissenschaftliche Praxis besteht nach Latour aus einer Fülle solcher Überführungen, die dazu dienen, lokale Phänomene in universell anwendbare Aussagen umzuwandeln. Diese müssen dazu als Äußerungen einer unabhängigen Natur interpretiert werden. Dazu müssen sie in eine Form „übersetzt“ werden, die als deren objektive Repräsentation anerkannt ist. Eine solche „Reinigung“ von den Spuren lokaler Bedingtheit geschieht z.B. über spezielle Schreibtechniken in wissenschaftlichen Publikationen oder durch den Einsatz von Instrumenten, die in der neuzeitlichen Naturwissenschaft den Status neutraler Protokollanten von Natur haben. Verfahren zur Übersetzung von „erforschten“ Zusammenhängen in zweidimensionale bildliche Darstellungen innerhalb von wissenschaftlichen Texten bezeichnet Latour als Einschreibungswerkzeuge (Inscription Devices).⁵¹ Ich verwende den Begriff der Übersetzung enger als Latour, da in dieser Untersuchung die verschiedenen Interessen einzelner Akteursgruppen nur am Rande eine Rolle spielen. Ich kennzeichne damit die Übertragung von heterogenen Elementen in ein formales Symbolsystem. Dies kann z. B. eine Modellierungssprache sein, in die die unterschiedlichen Annahmen über Welt und Zwecke, die ein Modell kennzeichnen, übersetzt werden müssen. Ebenso handelt es sich bei der Darstellung von Simulationsergebnissen in Computergraphiken um die Übersetzung von Zahlen und kulturellen Codes in ein bildliches Repräsentationssystem. Die Kategorie der Übersetzung dient mir auch dazu, den wissensstrukturierenden Aspekt von Simulationstechniken aufzuzeigen. Denn Übersetzungen in ein vorgegebenes Formalsystem sind nicht beliebig möglich. Die Elemente müssen erst auf eine passende Form gebracht werden. Dabei geht alles Nicht-Übersetzbare verloren. Diesen Aspekt von Übersetzung hat besonders Susan Leigh Star (1991) hervorgehoben. Sie kritisiert Latours Fokus auf die erfolgreichen Übersetzungen des Wissenschaftsbetriebs und verweist auf die Machtförmigkeit von Übersetzung. Diese kann nur dann verstanden werden, wenn das Nicht-Übersetzbare charakterisiert wird. Wenn hier also die Übersetzung verschiedener Wissensbestandteile in die von dem Modellierungsverfahren vorgegebene Form beschrieben wird, soll immer besonders nach den ausgeschlossenen Wissensanteilen gefragt werden.

Das Stabil-Mobil

Bruno Latour nennt bestimmte Bedingungen für den Erfolg von Übersetzungen. Die Etablierung von Fakten funktioniert nur dann, wenn diese schnell und ohne Veränderung verbreitet werden können. Um dies zu garantieren, werden sie in geeignete Träger-Objekte eingeschrieben und mit anderen Elementen zu einem stabilen Paket zusammengeschnürt. Neben der Stabilität solcher Einschreibungen ist für Latour die

50 Obwohl ich nicht allen Aspekte der von Latour in der Folge von „Science in Action“ entwickelten Ansätze insbesondere nicht der von ihm geforderte Aufhebung der Unterscheidung zwischen menschlichen und nicht menschlichen Akteuren folge, verwende ich diese „frühe“ Begrifflichkeit von Latour, da ich sie für sehr gut dafür geeignet halte, die Produktion wissenschaftlich technischen Wissens zu beschreiben.

51 Vgl. Latour (1987, S. 68) und (2000, S. 375). Im Zusammenhang mit der Visualisierung von Simulationsergebnissen werde ich diesen Begriff ebenfalls verwenden. Für die Kennzeichnung der Simulationsaktivitäten insgesamt scheint mir aber der unten eingeführte Begriff „Immutable Mobile“ geeigneter.

Mobilität der beschriebenen Objekte sowie ihre Kombinierbarkeit mit anderen Netzwerkelementen entscheidend. Die schnelle Verbreitung solcher Theorie-Praxis-Pakete ist nach Latour von existenzieller Bedeutung für die Akteure des Wissenschaftsbetriebes, um ihre Ansprüche innerhalb des Netzwerkes wissenschaftlicher Faktenbildung zu stärken. Techniken und Objekte, die eine solche Kombination von Mobilität und Stabilität produzieren, bezeichnet Latour als „Immutable-Mobiles“.⁵² Beispiele für Immutable-Mobiles sind nach Latour (1988) die technische Zeichnung, die Linearperspektive und die Kartographie. Diesen Begriff möchte ich für die Kennzeichnung von Computersimulationen verwenden und dazu mit dem Begriff „Stabil-Mobil“ paraphrasieren. Ideale Übersetzungen produzieren somit die schnellen, aber robusten Stabil-Mobile. Computergestützte Simulation und Modellierung ermöglichen eine extrem schnelle Verbreitung technischer Lösungskonzepte, aber auch einen stabilen Transport z. B. in Form fertiger Software oder von Datenbanken. In noch viel größerem Maße als über die technische Zeichnung bestehen über den Computer Kombinationsmöglichkeiten unterschiedlichster Pakete von Daten und Methoden. Die Analysekategorie des Stabil-Mobils scheint mir daher für diese Untersuchung fruchtbar zu sein.

Rechenzentren und Laborausweitung

Mit der Hilfe von Übersetzungstechniken und Einschreibungen werden konkrete Objekte in Rechengrößen verwandelt. Weitere Techniken, wie etwa statistische Verfahren, dienen dazu, diese Rechengrößen nochmals zu ordnen und handhabbar zu machen. Dadurch wird für Latour eine effektive Handhabung dieser verstreuten Objekte durch wenige „Rechenzentren“ (Centres of Calculation) auch über weite Entfernungen hinweg möglich gemacht.⁵³

Einen anderen Aspekt von Laborwissenschaften hat Bruno Latour (1983) in seiner Untersuchung der Forschungsarbeiten von Pasteur hervorgehoben. Latour zeigt hier, wie die Anwendung der Ergebnisse der Forschungen aus Pasteurs Labor auf die realen Verhältnisse es notwendig machte, diese Welt zu verändern.⁵⁴ Dieses Phänomen der „Ausweitung des Labors auf die Welt“ läßt sich auch auf die „Freisetzung“ simulierter Technologie in reale Umgebungen übertragen. Auch hier muß die Welt gezielten Umformungen unterworfen werden, damit die Simulation „wahr“ werden kann. Diese Umformungen aufzuzeigen und zu charakterisieren ist ein wesentliches Anliegen meiner Arbeit. Daher werde ich in Anlehnung an Latour bei der Analyse der Implementierung simulierter Technologie von einer „Ausweitung des Computer-Labors“ sprechen.

Die Verwendung von Bruno Latours Analysekategorien für die Beschreibung technikwissenschaftlicher Methodik steht meines Erachtens nicht in Widerspruch zu dem eingangs aufgestellten Anspruch dieser Arbeit, diese Methodik als Ausdruck gesellschaftlicher Strukturierungen zu verstehen. Latour vermeidet es zwar sorgfältig,

52 Vgl. Latour (1987, S. 227 sowie 1988, S. 26 ff. und 2000, S. 375).

53 Vgl. Latour (1987, S. 215 ff.).

54 Auch dieses Kennzeichen neuzeitlicher Wissenschaft, für die Gültigkeit ihrer Ergebnisse immer die Welt umformen zu müssen, ist nicht erst von Bruno Latour entdeckt worden. (Vgl. z. B. Böhme 1992b). Zudem kann eine Parallele zu Ansätzen wie den schon erwähnten von Schmiede (1996) oder Heintz (1993) gezogen werden, mit denen versucht wird, die Formalisierungen der Informationstechnologien als realitätskonstituierende Praxen zu beschreiben (vgl. auch Anm. 43).

einem Bereich seiner Netzwerke eine Priorität einzuräumen und betont die Gleichzeitigkeit, mit der etwa ökonomische, politische und wissenschaftliche Elemente in diese Netzwerke eingehen. Dennoch weist er ausdrücklich darauf hin, daß die von ihm beschriebene Art der Wissensproduktion dazu beiträgt, die Machtförmigkeit des Gesamtsystems zu erhalten und den Abstand zu anderen Formen von Wissensgewinnung zu vergrößern:

„All these objects occupy the beginning and the end of a similar accumulation cycle; no matter whether they are far or near, infinitely old or young, they all end up at such scale that a few men or women can dominate them by sight; at one point or other they all take the shape of a flat surface of paper that can be archived, pinned on a wall and combined with others; they all help to reverse the balance of forces between those who master and those who are mastered.“ Latour (1987, S. 227)

Ganz ähnlich wie für Max Weber ist für Latour die Umformung von Objekten zu Gegenständen von Berechnungen ein gemeinsames Kennzeichen aller Bereiche moderner Gesellschaften, in denen wirkmächtiges Wissen produziert wird. Damit sind Latours Analysen durchaus anschlussfähig an sozialwissenschaftliche Analysen wissenschaftlicher Rationalität, die eher den Aspekt der Herrschaftsstabilisierung durch die „Reinigung“ von Erfahrung zu objektiven Fakten im Blick haben, denn die von Latour entwickelten Begriffe eignen sich sehr gut dazu, die Praxis der Herstellung technisch/wissenschaftlicher Universalität im Hinblick auf verallgemeinerbare Charakteristika zu untersuchen.

Zusammenfassung: Modellierung und Simulation als soziotechnische Rekonfiguration

Mit dem in diesem Abschnitt eingeführten begrifflichen Instrumentarium ergibt sich nun folgende Perspektive auf Modellierung und Computersimulation: Die Modellierung erfordert eine zweckgerichtete Dekontextualisierung der betreffenden Weltausschnitte. Im Verlauf der Modellierung findet eine Rekonfiguration soziotechnischer Strukturen statt. Dabei fungiert die Modellierungssprache, in die alle Wissensanteile übersetzt werden müssen, als eine strukturierende Instanz. Der Computer, in den das Modell zum Zwecke der Simulation letztlich übertragen werden muß, gibt – ähnlich wie das naturwissenschaftliche Labor – den Rahmen für die Umordnungen vor und eröffnet der Wissensproduktion spezifische Steigerungen an Wirkmächtigkeit. Bei der Rekontextualisierung des produzierten Wissens in der Welt sind weitere Umformungen nötig. Meine These ist es, daß die „reale“ Umgebung der simulierten Welt angepaßt werden muß, damit die simulierte Technologie so wie in der Computer-Umgebung funktioniert.

1.4.2 Modellierung als Wissensstrukturierung

Die in dem letzten Abschnitt eingeführten Begriffe dienten dazu, technikwissenschaftliche Computersimulation in einen Gesamtzusammenhang technisch-wissenschaftlicher Praxis einzuordnen. Dabei stellt sich die Frage, wie sich die vermuteten Funktionen von Computersimulation als Vermittlungsinstanz zwischen gesellschaftlichen und materiellen Strukturen konkret in der Technikentwicklung realisieren. Die hier verfolgte These ist es, daß Computersimulation die Art und Weise strukturiert, in der sich menschliches Wissen in technischen Artefakten objektiviert. Diese Wissensstrukturierung, bei der einige Formen von Wissen ausgeschlossen, andere wiederum

verstärkt generiert und einbezogen werden, vermittelt – so die Vermutung – zwischen den gesamtgesellschaftlichen Prozessen und der konkreten Technikentwicklung. In dieser Arbeit wird, wie weiter oben ausführlich diskutiert wurde, davon ausgegangen, daß der Wissensbestand, auf den bei der Entwicklung von Technik zurückgegriffen wird, durch kulturelle und gesellschaftliche Bedingungen geformt ist. Es wurde postuliert, daß Computersimulation als Teil des Methodenkanons der Gewinnung technikwissenschaftlicher Erkenntnis den Prozeß der Wissensproduktion auf eine Weise strukturiert, daß bestimmte gesellschaftliche Strukturen stabilisiert werden. Innerhalb der bestehenden Formen der Wissensproduktion werden die beteiligten Akteure stets versuchen, die neuen Verfahren so einzusetzen, daß Machtverhältnisse zu ihren Gunsten verschoben werden. Dabei müssen die verschiedenen Ebenen, auf denen Strukturierungen von Wissensgenerierung stattfinden, neu geordnet werden. Für computergestützte Simulationstechniken können als typische Instrumente der „Wissensfilterung“ sowohl abstrakte Formalisierungsvorschriften als auch widerständige Komponenten der Computerhardware und kommerzielle Softwarepakete zur Computersimulation fungieren. Diese Techniken der Wissenstrukturierungen müssen neu mit dem Kontext von Technikentwicklung verbunden werden. Relevante Bestandteile dieses Hintergrundes sind etwa etablierte Organisationsformen industrieller Technikentwicklung und Produktion, Verbraucher- und Benutzergewohnheiten oder akademische Traditionen der Ingenieurwissenschaften. Dabei findet eine Wechselwirkung statt, durch die sich Brüche und unerwartete Effekte ergeben.

Um den vermuteten Neuordnungen nachzugehen, müssen Kriterien eingeführt werden, nach denen Wissenformen voneinander unterschieden werden können. Dabei ist keine Analyse der Natur technischen Wissens insgesamt intendiert. So soll die These von einer Veränderung der beteiligten Wissensformen auch nicht implizieren, daß hier eine Verschiebung zugunsten rein propositionalen – also explizit sprachlich formulierbaren – Wissens vermutet wird. Stattdessen wird mit einem soziologischem Wissensbegriff gearbeitet, der es ermöglicht:

„die Verhältnisse der Wissensformen untereinander als soziale Beziehungen der Wissensträger und ihrer Gruppen zu untersuchen“ Böhme (1997, S. 64).

Daher wird bei der Untersuchung der einzelnen Modellierungsverfahren und vor allem auch bei der Analyse konkreter Anwendung stets darauf zu achten sein, wie sich die Rolle einzelner Gruppen von Akteuren innerhalb der technischen Wissensgenerierung darstellt. So soll gefragt werden, ob es neue Personengruppen sind, die in dem Prozeß der Wissensgewinnung eine Rolle spielen, oder ob sich die Qualifikationsanforderungen an die beteiligten Personen verändern. So wäre es z. B. möglich, daß gerade personengebundenen, erfahrungsgeleitetes Wissen schlecht in sehr stark naturwissenschaftlich basierte Modellierungsansätze integrierbar ist. Andererseits kann es sein, daß sich gerade neue Bereiche der Erfahrungsbildung entwickeln. So wird von einigen Theoretikern vermutet, Computersimulation führe zu einem neuerlichen Bedeutungsgewinn visueller Komponenten in ingenieurwissenschaftlichen Arbeiten. Vertreter der Fuzzy Modellierung postulieren, diese Methode ermögliche in einer vollkommen neuen Weise die Integration menschlichen Erfahrungswissens in die Technikentwicklung.

Auch die Art des Zugriffs auf Wissen soll als Unterscheidungskriterium dienen. Veränderungen in der Kontrolle der Wissensanwendung und in der Art der Vermittlung

fallen unter diese Kategorie von Verschiebungen. In diesem Sinne wäre es durchaus als eine Veränderung der Wissensform zu bezeichnen, wenn sich z. B. der wesentliche Mechanismus der Wissensgewinnung zur Steuerung technischer Systeme von einer personengebundenen Beobachtung durch erfahrenes Fachpersonal zu einer automatischen Aufnahme festgelegter Meßwerte durch computergestützte Sensorik verschöbe.

Weiterhin soll nach dem Zusammenhang zwischen der Art der Wissensgenerierung und den Möglichkeiten des Umgangs mit den technischen Artefakte, in denen sich das generierte Wissen verobjektiviert hat, gefragt werden. Dabei geht es nicht nur um direkte Zusammenhänge zwischen Modellierungsentscheidungen und Eigenschaften technischer Artefakte, wie etwa, daß die bewußte Auswahl eines Optimierungskriteriums (z. B. Minimierung des Energieverbrauchs) andere Ziele (z. B. Lärmreduzierung) ausschließt. Darüber hinaus wird vielmehr vermutet, daß die Art der Verwertung menschlichen Wissens, die von dem Modellierungsansatz bestimmt wird, sich in grundsätzlichen Eigenschaften der Produkte dieser Wissensanwendung widerspiegelt. In diesem Sinne soll für jedes Verfahren nach charakteristischen Eigenschaften des mit der Hilfe der Modelle generierten Wissens über die modellierten Systeme gefragt werden.

Viele der angerissenen Fragestellungen können letztendlich nur durch detaillierte empirische Untersuchungen simulationsgestützter Technikentwicklung geklärt werden. Die Analyse der Verfahrensweisen selber und auch der Literatur über Erfahrungen in der konkreten Anwendung gibt jedoch zahlreiche Hinweise auf Verschiebungen der Wissensformen im geschilderten Sinne. Diese Hinweise sollen so oft wie möglich aufgenommen werden, um so die These von der wissensstrukturierenden Funktion computergestützter Simulation mit konkreten Inhalten zu füllen.

1.4.3 Modellierung und Finalisierung

Computersimulation greift an einer zentralen Stelle technikwissenschaftlicher Aktivität ein: Der Übersetzung theoretischer Konzeptualisierungen von Welt in reale Kontexte. Eine solche Anwendung theoretisch-naturwissenschaftlicher Erkenntnisse auf reale materielle Strukturen wird in der Entwicklung von Technik traditionell auf viele verschiedene Weisen vorgenommen. Eine zentrale Rolle spielen dabei Experimente und Erfahrungsregeln. Spezielle Technik-Theorien leisten für anwendungsrelevante Objektklassen eine Vermittlung zwischen der Grundlagentheorie und konkreten Anwendungsbereichen. Die Abgleichung zwischen Laborexperiment, Spezialtheorie, Erfahrungsregel und dem tatsächlichen Artefakt in seiner realen Umgebung ist ein äußerst mühseliger personal- und kostenintensiver Vorgang, in dem viele Rekonfigurationen von Elementen aus den unterschiedlichsten Bereichen involviert sind. Ist eine mathematische Beschreibung der technisch zu verarbeitenden Vorgänge vorhanden, kann diese unter bestimmten Voraussetzungen für die Technikentwicklung fruchtbar gemacht werden. Einen theoretischen Rahmen zur Beschreibung dieses Vorgangs liefert die von der „Starnberger Forschungsgruppe“ schon in den 70er Jahren entwickelte „Finalisierungstheorie“.⁵⁵ Die Finalisierungstheorie beschreibt die Anwendung naturwissenschaftlicher Konzepte auf praktische Problemstellungen als Entwicklung von Anwendungsgrundlagentheorie aus der Fundamentaltheorie („Finalisierung“).

⁵⁵ Eine zusammenfassende Darstellung des Finalisierungskonzeptes findet sich in Böhme u.a. (1978).

Dieser Vorgang finde in der postparadigmatischen Phase eines Wissenschaftsgebietes statt. In dieser Phase sei die grundlegende Theoriebildung des Fachgebietes abgeschlossen. Die Entwicklung von Spezialtheorien, die dezidierte Anwendungsgebiete behandeln, könne aus verschiedenen Gründen für die Praxis der Technikentwicklung notwendig sein. Entweder seien die Gleichungen zwar vorhanden und machten grundsätzliche Aussagen über die Zusammenhänge zwischen den physikalischen Grundgrößen, seien aber nicht lösbar. Oder es existierten zwar Lösungen für die Grundgleichungen, aber diese beschrieben das tatsächlich zu beobachtende Verhalten nicht angemessen. Erst mit Hilfe der Anwendungsgrundlagentheorie kann, der Finalisierungstheorie zufolge, in solchen Fällen eine praktische Verwendung der Fundamentaltheorie stattfinden. Einer Spezialtheorie für ein bestimmtes Anwendungsgebiet liege dabei stets ein zusätzliches Konzept zugrunde. Als Beispiele für solche Zusatzkonzepte nennt Böhme für den Bereich der Strömungsforschung das Prandtl'sche Grenzschichtkonzept und die Tragflügeltheorie.⁵⁶ Beides sind begriffliche Konzepte, mit denen die abgeschlossene Fundamentaltheorie, in diesem Fall die klassische Hydrodynamik, ergänzt wird, um sie für konkrete Phänomene anwendbar zu machen. Beide Konzepte beziehen sich auf empirisch beobachtbare Phänomene (die Grenzschicht und die Wirbelbildung um Tragflügel). Die Analyse der Kopplung zwischen Grundlagentheorie und Anwendung ist für die „Starnberger Forschungsgruppe“, der es auf die „gesellschaftliche Orientierung“ wissenschaftlichen Fortschritts ankommt, deswegen so wichtig, weil nach ihrer Auffassung in der Entwicklung der Anwendungstheorien gesellschaftliche Zwecke direkt in die Theoriebildung einfließen. Für welche Klassen von Objekten nämlich überhaupt Anwendungstheorien gebildet werden, hängt für sie von gesellschaftlichen Interessenlagen ab:

„Externe Zwecke wirken aber schon in den Prozeß der Theoriespezialisierung regulativ ein. Sie definieren Forschungsprobleme und erfordern begriffliche Erweiterungen der allgemeinen Theorien, für die es keine wissenschaftsinterne Notwendigkeit gibt.“ (Böhme u.a 1978, S. 232)

Da Computersimulation gerade in diesem „Prozeß der Theoriespezialisierung“ mitwirkt, ist es zu vermuten, daß sich auch die Mechanismen der Finalisierung auf gesellschaftliche Zwecke hin verschieben. So wäre es etwa eine denkbare These, daß die Bildung von Objektklassen, wie sie von der Finalisierungstheorie als zentraler Angriffspunkt für gesellschaftliche Zwecksetzungen beschrieben wird, keine so entscheidende Rolle mehr spielt, wenn über Computersimulation jeder Einzelfall direkt aus der Grundlagentheorie heraus behandelt werden kann. Der Frage nach neuen „Finalisierungspfaden“ wird daher im Verlauf der Untersuchung immer wieder nachgegangen werden.

56 Siehe Böhme (1978, S. 97 ff.).

2 Technikwissenschaftliche Computersimulation – Erste Annäherungen an den Gegenstand

In diesem Kapitel werden einige Facetten des Untersuchungsgegenstandes näher beleuchtet. Zunächst wird kurz geschildert, wie sich die Computersimulation als Methode der Technikentwicklung verbreitet hat. In Abschnitt 2.2 wird ein Überblick darüber gegeben, welche Funktionen Simulationen bei der Entwicklung technischer Systeme übernehmen. Dabei werden erste Vermutungen darüber angestellt, welche Qualitäten das durch Simulation gewonnene Wissen von den Ergebnissen früherer Methoden möglicherweise unterscheiden. Anschließend wird umrissen, wie sich die neue Methode in die ingenieurwissenschaftliche Ausbildung und die industrielle Praxis integriert. Als wesentliche Aspekte des Einsatzes von Simulationstechniken werden Visualisierung, Software und Rechnertechnik vorgestellt. Abschließend wird herausgearbeitet, wie Simulationstechniken im Sinne des in der Einführung entwickelten Konzeptes als Vermittler soziotechnischer Strukturierungen interpretiert werden können. Daraus werden leitende Fragestellungen für die Untersuchungen der einzelnen Verfahren in Kapitel 3 abgeleitet. Die folgenden Ausführungen beziehen sich zum Großteil auf analytisch basierte Computersimulation. Da diese eine wesentlich größere Bedeutung für die Technikentwicklung hat, als die anderen hier vorzustellenden Modellierungstechniken, soll sie für deren Analyse als eine Folie dienen. Einige Angaben zur Verbreitung von konnektionistischer Modellierung und Fuzzy Ansätzen finden sich in den jeweiligen Abschnitten.

2.1 Vorläufer und Verbreitung

Als Vorläufer moderner digitalrechnergestützter Simulationen kann die Simulation auf dem Analogrechner betrachtet werden, die vor dem Aufkommen digitaler Rechner eine verbreitete Analysemethode der Technikwissenschaften war. Dabei werden bestimmte mathematische Funktionen durch elektrische Komponenten direkt nachgebildet.¹ Durch Zusammenschalten solcher Komponenten können komplexe mathematische Zusammenhänge aller Art an dem Analogrechner „nachgebaut“ werden. Werden an diese Schaltungen gezielt Spannungen angelegt, so kann aus dem Verlauf der Ausgangsspannung eine Lösung der Gleichung entnommen werden. Aus solchen analogen Simulationen lassen sich Aussagen über das Verhalten der nachgebildeten Systeme gewinnen. Mit der Verbreitung von Digitalrechnern und vor allem der Verbilligung von Rechenkapazität wurden die Analogrechner jedoch weitgehend verdrängt. Unter den zahlreichen verschiedenen Einsatzweisen von Digitalrechnern für technisch relevante Computersimulationen hat die digitalrechnergestützte numerische Behandlung von Differentialgleichungen, wie sie in Abschnitt 3.3 beschrieben werden wird, eine herausragende Bedeutung. Erste Ansätze zur numerischen Lösung partieller Differentialgleichungen, wie sie vor allem in der Strömungsmechanik auftreten, wurden 1910 entwickelt. Diese Lösungsalgorithmen wurden von menschlichen „BerechnerInnen“ ausgeführt. In den 1940er Jahren wurden solche Verfahren erstmals auf konkrete Strömungsprobleme angewandt.² Die Implementierung numerischer Methoden auf Digitalrechnern setzte Anfang der 1950er Jahre, bald nachdem die ersten Rechenanlagen verfügbar waren, ein. Erst dieser Schritt verhalf den numerischen Methoden zu einem echten Durchbruch. Durch die massive Nachfrage der Simulationsanwender nach

1 So kann etwa ein elektrischer Kondensator ein Element mit integrierendem Verhalten nachbilden.

2 Einen kurzen Abriss der Entwicklung numerischer Methoden für Strömungsprobleme gibt Graves (1982, S. 22 ff.).

immer effektiveren numerischen Methoden hat die Numerik heute innerhalb der Mathematik sehr an Bedeutung gewonnen.

Numerische Rechenverfahren umfassen eine große Anzahl von Rechenschritten und benötigen damit eine große Menge an Rechenkapazität. Diese kann nur durch sogenannte Supercomputer zur Verfügung gestellt werden. Zu Beginn der 1950er Jahre waren es in den USA ausschließlich staatlich geförderte Institutionen, die das Kapital für diese äußerst kostspieligen Rechanlagen aufbrachten.³ Dabei standen militärische Forschungsanliegen, vor allem die Entwicklung von Kernwaffen, im Vordergrund. Erste zivile Projekte befaßten sich mit der Untersuchung der Wetterentwicklung⁴ und mit diversen Strömungsproblemen.⁵ Erst sehr viel später fanden digitale computergestützte Simulationstechniken Eingang in die industrielle Praxis. Vorreiter waren hier die Automobilindustrie und die Hersteller von Chiptechnologie. Inzwischen jedoch sind computergestützte Simulationen in allen Branchen der Technikentwicklung verbreitet. So gaben in einer Ende 1996 durchgeführten Studie zum Stand der Simulationsanwendung in Deutschland 65% der befragten Unternehmen an, Simulationstechniken einzusetzen.⁶ Ein Großteil dieser Unternehmen hatte dabei erst in den letzten 6 Jahren mit dem Einsatz der Simulationstechnik begonnen. Weitere 11% der Unternehmen planten in naher Zukunft einen Einsatz von Simulationstechniken.

2.2 Anwendungsgebiete und Einsatzweisen

Die Anwendungspalette von Computersimulationen in der Technikentwicklung ist äußerst vielfältig. Von der Lagerhaltung bis zur Verkaufsentwicklung kann mittlerweile jeder Vorgang, der für die Herstellung und Vermarktung technischer Artefakte von Bedeutung ist, durch Computersimulationen behandelt werden. In dieser Untersuchung soll jedoch nur eine der zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten behandelt werden: Die Simulation des Verhaltens materieller Strukturen zum Zwecke ihrer technischen Verarbeitung. Dabei kann es sich sowohl um technisch zu nutzende Prozesse, wie Verbrennungen oder chemische Reaktionen als auch um ganze großtechnische Anlagen, etwa einen Stahlofen oder eine Kläranlage, handeln. Aber auch einzelne

3 Hier sind vor allem die Atomwaffenforschungslabore Los Alamos und Livermore zu nennen, deren maßgeblicher Einfluß auf die Entwicklung der Supercomputertechnik von Donald MacKenzie (1996) ausführlich geschildert wird.

Vgl. auch Kaufmann/Smarr (1994): „Supercomputer binden nicht nur bei der Anschaffung viel Kapital; auch zur Bedienung und Wartung werden große Arbeitsgruppen benötigt. Dreißig Jahre lang, von den fünfziger bis zu den siebziger Jahren, konnten sich daher nur Regierungen ihre Anschaffung leisten...“ (S. 31).

4 Die erste numerische Wettervorhersage wurde, laut Chapman (1979, S. 1307), 1950 durch Charney, Fjörtoft und von Neumann auf dem 1946 entwickelten ENIAC Computer durchgeführt.

5 Kaufmann/Smarr (1994, S. 24) nennen als „Pionierarbeit“ in der computergestützten Simulation von Naturvorgängen eine 1972 an der Universität von Illinois durchgeführte Simulation der Entwicklung von Gewittern. 1980 war es dann möglich, die zeitliche Entwicklung eines konkreten vermessenen Unwetters in der Simulation nachzuvollziehen.

Anderson (1996, S. 2 ff.) beschreibt die Problematik der Berechnung des Verhaltens eines stumpfen Körpers bei Eintritt in die Erdatmosphäre („blunt body problem“) als einen maßgeblichen Antrieb zur Einführung numerischer Simulation in die Aerodynamik in den 1960er Jahren.

6 Reinhart/Feldmann (1997, S. 2). Diese Angaben umfassen allerdings auch Ablaufsimulationen von Fertigungsvorgängen und rein graphische Simulationen, wie sie in dieser Arbeit nicht behandelt werden. Die Autoren der Studie weisen zudem darauf hin, daß sich überproportional viele größere Unternehmen an der Befragung beteiligten (S. 1).

Bauteile, wie eine Schraube, ein Bolzen oder ein Zahnrad können durch Computersimulationen in ihrem Verhalten untersucht werden. In der Regel geht es hier damit um die Simulation kontinuierlicher dynamischer Systeme⁷ in Zeit und Raum. Nicht behandelt werden Simulationen diskreter Vorgänge wie etwa von Arbeitsabläufen. Im folgenden wird ein Überblick darüber gegeben, zu welchen Zwecken solche Simulationen in der Technikentwicklung primär eingesetzt werden. Dabei handelt es sich um Einteilungen und Bewertungen, wie sie innerhalb der Ingenieurwissenschaften selbst vorgenommen werden. Im Verlauf der späteren detaillierten Analyse der einzelnen Verfahren werden einige der in den folgenden Abschnitten getroffenen Aussagen differenziert werden müssen.

Entwicklung, Konstruktion

Bei der Entwicklung technischer Artefakte kommen vor allem analytisch basierte Computersimulationen zum Einsatz. Eines der am meisten angewendeten Verfahren dieser Art ist die in Abschnitt 3.4 untersuchte „Methode der Finiten Elemente“. Auf der Basis solcher Simulationen kann im Vorfeld der Entwicklung das Verhalten des entworfenen Systems in verschiedenen Betriebszuständen durchgespielt werden. Bevor überhaupt reale Bauteile existieren, kann in der Simulation am mathematischen Modell ausprobiert werden, ob ein Projekt überhaupt realisierbar ist (Machbarkeitsanalyse). Weiter ist es mit der Hilfe von Simulationen möglich, die Vor- und Nachteile verschiedener Varianten gegeneinander abzuwägen. Im weiteren Verlauf der Entwicklung können Simulationen im Abgleich mit realen Experimenten zusätzliche Informationen liefern. Außerdem kann eine Simulation technischer Systeme auch nachträglich durchgeführt werden, um die Ursache für aufgetretene Störungen zu ermitteln und mögliche konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung des Artefaktes zu entwerfen (Schadensanalyse). In allen Fällen sind auf der Basis von Simulationen Erkenntnisse möglich, die durch Messungen und Experimente nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand erreicht werden können.⁸ Idealerweise kann über eine analytisch basierte Simulation für jede in dem Modell enthaltene physikalische Größe, an jedem Ort des untersuchten Bereiches, zu jeder Zeit ein Wert angegeben werden. Damit wird die Reichweite technologischer Verfügung „nach innen“ erweitert. Anhand der über die Simulationen ermittelten detaillierten Informationen können technische Artefakte gezielt optimiert werden. So ist es etwa möglich, ein Bauteil genau dort zu verstärken, wo nach den Ergebnissen der Simulation bei Belastung hohe Kräfte auftreten. Die Geometrie einer Düse kann exakt so bestimmt werden, daß möglichst wenige Störungen der Strömung auftreten, und die Form eines Fensters wird in dem Modell so lange verändert, bis die Simulation den geringsten Verlust an Wärme anzeigt. Außerdem können Situationen simuliert werden, deren experimentelle Untersuchung aus Sicherheitsgründen nicht möglich ist, wie etwa das Verhalten technischer Anlagen außerhalb des im Betrieb zulässigen Bereichs.

Zu Beginn der Verbreitung von Computersimulation waren es, wie oben schon erwähnt wurde, vor allem Fragestellungen aus Gebieten der Technikentwicklung, die sich in schwer zugänglichen Bereichen bewegen, wie etwa aus der Kernwaffentechnik oder aus der Weltraumforschung, die den Einsatz von Computersimulation vorantrie-

⁷ Eine Erläuterung des Begriffs „dynamisches System“ findet sich auf Seite 41.

⁸ Das bedeutet natürlich auch umgekehrt, daß viele der Informationen, die eine Simulation liefert, meßtechnisch in keiner Weise mehr nachzuprüfen sind. Darauf weist z. B. Kaiser (1997, S. 527) hin.

ben. In anderen Bereichen, in denen schon eine lange Tradition experimenteller Untersuchungen bestand, wurden die erforderlichen Experimente mit zunehmend ehrgeizigen Zielen technologischer Forschung immer teurer. So sind die in der Flugzeugentwicklung üblichen Experimente im Windtunnel für spezielle Phänomene wie den Überschallflug sehr aufwendig und liefern zudem nur eingeschränkt gültige Aussagen.⁹ Andererseits war gerade in diesen Feldern technikwissenschaftlicher Forschung eine stärkere Auswertung der durchaus vorhandenen naturwissenschaftlichen Grundlagentheorie oft nicht möglich, da für die allgemeinen Gleichungen keine analytischen Lösungen für praxisrelevante Fälle angegeben werden konnten und somit die benötigten detaillierten Informationen nicht anzugeben waren.¹⁰ Das Erkenntnisinteresse aktueller Simulationsanwendungen setzt sich aus den genannten Komponenten zusammen. Einerseits sind wegen besonderer Einsatzgebiete Informationen gefragt, die nur die analytisch nicht lösbaren Grundgleichungen liefern können. Andererseits soll das Verhalten eines ganz bestimmten konkreten Artefaktes, z. B. eines Rotorblattes mit einer speziellen Form, untersucht und optimiert werden, was wegen der vielen Randbedingungen ohne Simulation auch schon für einfache Grundgleichungen unmöglich wäre. Desweiteren sollen die zu untersuchenden Systeme möglichst umfassend und tiefgehend analysiert werden. Zusammenfassend läßt sich damit festhalten, daß in der Entwicklung technische Systeme mit der Hilfe von Computersimulation sowohl nach innen als auch nach außen die vorherigen Grenzen technologischer Verfügung ausgedehnt werden.

Regelung und Steuerung

Viele technische Geräte werden während ihres Betriebs ständig über elektronische Signale in ihrem Verhalten beeinflusst.¹¹ Die Steuerungs- und Regelungstechnik, das Fachgebiet, in dem die Konzepte für solche Beeinflussungen entwickelt werden, hat durch den Einsatz von Computersimulationen zahlreiche Möglichkeiten dazugewonnen. So vereinfacht der Einsatz von rechnergestützten Simulationen die Entwicklung von Regelungsstrategien erheblich. Steht einmal ein mathematisches Modell des behandelten Systems in dem Computer zur Verfügung, können die Auswirkungen verschiedener Regelungsstrategien am Bildschirm daran getestet werden. Die Simulation gibt dann Auskunft darüber, wie das System reagiert, wenn es mit bestimmten Steue-

- 9 Chapman (1979, S. 1293) beschreibt diese Entwicklung in der Aerodynamik. Neben der Beschränktheit der möglichen Untersuchungen und ihrer Ungenauigkeit führt er die explodierenden Kosten und den enormen Energieverbrauch von Windkanälen an und kommt zu dem Schluß: „Thus the development of computational aerodynamics is expected to lessen considerably the potential impact of such restrictions“ (S.1294). Ähnlich argumentieren Moin und Kim (1999, S. 45): „Kürzlicherweise kommt die simulierte Strömung im Computer der Realität häufig näher als die echte im Windkanal. Zum Beispiel unterliegt sie keinen Störungen durch die Kanalwände und die Halterung, an der das Modell im Kanal hängt.“ Bis heute sind es häufig Geschwindigkeitsgrenzen, die mit der Hilfe von Computersimulation überschritten werden. So nennen Moin und Kim (1999) folgenden Grund für die Notwendigkeit zur Weiterentwicklung von Computersimulation in der Aerodynamik: „Zudem werden einige Flugkörper der Zukunft ein Vielfaches der Schallgeschwindigkeit erreichen und die Bedingungen eines Hyperschallflugs (mit bis zu 20facher Schallgeschwindigkeit) in extrem dünner Luft oder außerhalb der Atmosphäre sind im Windkanal gar nicht herstellbar.“ (S. 45).
- 10 Ausführlich zu dem Dilemma der Nichtlösbarkeit von Differentialgleichungen vgl. den Abschnitt zur analytischen Modellierung auf Seite 44 und die in Abschnitt 1.4.3 zusammengefaßte Analyse dieser Situation durch die Finalisierungstheorie.
- 11 Man spricht von einer Regelung, wenn das Verhalten des Systems selbst gemessen und ausgewertet wird, um die nächste Steuerungsaktion zu bestimmen (geschlossener Wirkungskreis), und von einer Steuerung, wenn das System nach einem festen Schema beeinflusst wird, ohne daß die Reaktion kontrolliert wird (offene Wirkungskette).

rungsaktionen beeinflußt wird. Eine solche Vorhersage ist mit klassischen mathematischen Lösungsansätzen für die Systemgleichungen aus den oben geschilderten Gründen für reale Systeme in der Regel nicht möglich. Auch gegenüber der experimentellen Untersuchung technischer Systeme bietet die Simulation Vorteile. So kann das Systemverhalten in Grenzbereichen simuliert werden, die experimentell nur schwierig oder gar nicht zugänglich sind. Ist ein technisches Gerät schon entwickelt und gebaut, kommt die sogenannte Echtheilesimulation zum Einsatz. Dabei wird der Regler simuliert und an das reale Gerät angeschlossen (Schnelles Reglerprototyping). Ist umgekehrt das Steuerungsgerät schon vorhanden, kann dieses an ein simuliertes Gerät angeschlossen und getestet werden (Hardware-in-the-Loop Simulation).

Vor allem bei der Durchführung komplizierter und kostenintensiver technischer Prozesse werden vielfach Simulationen eingesetzt, um die optimale Einstellung aller Bedienungparameter zu ermitteln. Ein typisches Beispiel ist die Papierherstellung, bei der u. a. die Dauer und die Temperatur des chemischen Prozesses erheblichen Einfluß auf die Qualität des Produktes haben. Mit Simulationen auf der Basis von konnektionistischen Modellen wird der Prozeß unter verschiedenen Einstellungskonfigurationen am Computer durchgespielt. Diejenige Einstellung, die in der Simulation den vorgegebenen Kriterien am besten genügt, kann dann für den realen Betrieb übernommen werden. Auf diese Weise kann die Ausschußrate erheblich verringert werden. Computersimulationen, die nicht auf rein analytischen Modellen beruhen, sondern auf Ansätzen wie der Fuzzy-Logik oder den konnektionistischen Modellen, werden zu einem großen Teil zu Zwecken der Regelung entwickelt und eingesetzt. Mit der Hilfe solcher Formalisierungsverfahren kann eine automatisierte Steuerung technischer Systeme auch dann realisiert werden, wenn das Systemverhalten mit analytischen Modellierungsansätzen nicht zu beschreiben ist. Darüber hinaus werden viele Regelungskonzepte, die auf analytischen Modellierungen beruhen, über die Ausnutzung digitaler Computersimulation erst praktisch anwendbar. Frühere Konzepte begnügten sich häufig damit abzusichern, daß technische Anlagen nicht in kritische Betriebsbereiche mit instabilem Verhalten gelangten und dennoch mit zufriedenstellender Geschwindigkeit auf neue Sollwertvorgaben reagierten. Mit modernen computergestützten Regelungskonzepten dagegen können technische Systeme gezielt so gesteuert werden, daß verschiedene spezielle Kriterien erfüllt werden.¹² Durch solche Veränderungen ergeben sich zwangsläufig neue Formen von Zwecksetzungen für technische Systeme. Je detaillierter die zugrundeliegenden Systemmodelle dabei sind, desto dichter kann auch an kritischen Bereichen gearbeitet werden. Die Verbreitung von simulationsbasierten Regelungskonzepten verändert das Gesicht moderner Technologie in ebensolchem Maße wie die simulationsgestützte Entwicklung und Konstruktion. Viele technische Neuentwicklungen unterscheiden sich vor allem durch neue Steuerungskonzepte von ihren Vorgängermodellen. Manche Klassen von technischen Lösungen werden durch die Anwendung von computergestützten Regelungstechniken überhaupt erst möglich. Ein Beispiel dafür bilden die

12 Ein besonders ausgefeiltes Verfahren der modellbasierten Regelung ist die „Zustandsregelung (optimal control)“. Hier wird parallel zu dem tatsächlich laufenden Prozeß (z. B. einer chemischen Reaktion in einer Kolonne) ein Modell desselben ausgewertet. Die Ergebnisse der an dem Modell durchgeführten Simulation werden dann ständig mit den Messungen an der Anlage verglichen. Auf der Basis der Ergebnisse dieses Vergleichs wird das Modell dann immer wieder korrigiert. Auf diese Weise kann die auf dem Modell basierende Regelung fortlaufend angepaßt und verbessert werden.

sogenannten „aktiven Komponenten“, die in modernen technischen Artefakten zunehmend Verbreitung finden. Solche Komponenten ersetzen „passive“ Konstruktionselemente wie etwa Federn, Dämpfer oder Lager. Anstatt die im Betrieb technischer Systeme auftretenden Verschiebungen und Kräfte nur „passiv“ aufzunehmen, erzeugen solche „Aktoren“, wie etwa Elektromagnete mit veränderlicher Magnetfeldstärke, „aktiv“ gezielte Gegenkräfte. Dieses Prinzip kann nur durch eine ständige Messung der auftretenden Kräfte und eine computergestützte Auswertung von Systemmodellen zur Berechnung der notwendigen Reaktion realisiert werden. Insgesamt ist es zu beobachten, daß der Anteil der Informationsverarbeitung in technischen Systemen immer mehr zunimmt. Für die Behandlung solcher Systeme hat sich innerhalb der Ingenieurwissenschaften mit der „Mechatronik“¹³ ein eigenes Fachgebiet herausgebildet, in dem Methoden aus der Mechanik, der Elektronik, der Regelungstechnik und Informatik vereint sind. Mechatronische Systeme sind ohne den massiven Einsatz von Simulation in der Entwicklung nicht denkbar. Sie beinhalten in der Regel sehr komplizierte Regelungskonzepte und weisen eine hohe Komplexität sowie eine sehr spezifische Zweckorientierung auf.¹⁴

Schulung und Ausbildung

Ein wichtiges Einsatzgebiet für Simulationen ist die Einstellung von sogenannten Mensch-Maschine-Systemen. Die Bedienung komplexer technischer Systeme durch Menschen wird, wie etwa im Flugsimulator, mit Hilfe von Simulationen eingeübt. Außerdem wird in simulationsgestützten Versuchen das menschliche Verhalten untersucht, um die technischen Systeme bedienergerecht auslegen zu können. Eine zunehmend große Rolle spielt auch der Einsatz von Modellierung und Simulation zu pädagogischen Zwecken. Die Möglichkeit, ohne Gefahr und Kosten das Verhalten von technischen Systemen untersuchen zu können, wird zunehmend für die Ausbildung von IngenieurInnen genutzt. Anstatt reale Anlagen oder aufwendige experimentelle Aufbauten umzubauen, brauchen in einer Simulation lediglich mathematische Gleichungen manipuliert werden, wenn veränderte Systeme oder neue Einsatzweisen untersucht werden sollen. Die Auswirkungen der getroffenen Veränderungen können sofort am Bildschirm beobachtet werden, ohne daß, wie bei realen Systemen, zeitaufwendige, mühselige Messungen durchgeführt werden müssen. Auf diese Weise wird es nach der Auffassung vieler Lehrender für die Studierenden leichter, ein Verständnis für das Verhalten technischer Systeme zu entwickeln. An vielen ingenieurwissenschaftlichen Fachbereichen sind mittlerweile simulationsbasierte Lernsysteme für die Ingenieurausbildung im Einsatz. Dabei reicht die Palette von ganzen virtuellen „Laborumgebungen“¹⁵ bis zu Simulationsbaukästen für die Mechanikvorlesung.

13 Einen Überblick über die Inhalte der Mechatronik und die Aktivitäten in Lehre und Forschung gibt Schweitzer (1996). An der TU-Darmstadt beschäftigt sich der Sonderforschungsbereich 241 IMES (Integrierte mechanisch-elektronische Systeme) mit mechatronischen Fragestellungen.

14 Ein Beispiel für eine solche auf den Ergebnissen modernster Computersimulation aufbauende Technologie geben Moin und Kim in ihrem Aufsatz zur Modellierung von Turbulenz in dem Abschnitt „Von der Vorhersage zur Beherrschung“ (1999, S. 49): „Eine weitere vielversprechende Anwendung ist die aktive Beeinflussung der Turbulenz [in einer Strömung P.W.] durch bewegliche Teilchen. Mit ihnen könnte man die Oberfläche eines Tragflügels in Reaktion auf die turbulenten Schwankungen der Strömung jeweils geringfügig verformen. In die Haut des Flügels müßten dazu Millionen von Sensoren und Verstellmechanismen eingebettet sein, die auf Änderungen von Druck und Strömungsgeschwindigkeit so rasch reagieren, daß die kleinsten Eddies [eine Art Wirbel P.W.] beeinflußt werden.“

Verkauf

Von einiger Bedeutung für die Industrie ist der Einsatz von Simulationen bei dem Verkauf technischer Artefakte. Den Kunden können im Vorfeld der eigentlichen Fertigung die Eigenschaften und das Verhalten des Produktes am Bildschirm vorgeführt werden. In vielen Fällen wird eine Simulation der Produktfunktionen auch von den Abnehmern verlangt. So gaben in der schon erwähnten Studie zum Stand der Simulationstechnik immerhin 15% der Simulationsanwender an, die Simulation sei von Dritten gefordert, 5% der Unternehmen nannten Imagegründe für den Einsatz von Simulationstechniken.¹⁶

2.3 Computersimulation in Ingenieurausbildung und industrieller Praxis

Mit der rasanten Verbreitung der Computersimulation als einer der wesentlichen Methoden der Generierung von Wissen in der Technikentwicklung hat sich auch die Lehre in den Ingenieurwissenschaften verändert. Zum Einen haben neue Fächer, die sich direkt mit den Erfordernissen der Computersimulation befassen, an Bedeutung gewonnen. So haben Fächer wie „Ingenieurinformatik“ und die „Numerische Mathematik“ feste Plätze im ingenieurwissenschaftlichen Lehrplan erobert. Zum Anderen haben sich jedoch auch die klassischen Fächer der technikkwissenschaftliche Ausbildung auf die Anforderungen der Computersimulation eingestellt. So nehmen in vielen Fächern die mathematische Modellierung und die computergerechte Umsetzung grundlegender theoretischer Konzepte einen immer größeren Raum ein. Dabei bleibt allerdings das Problem bestehen, daß für die praxisrelevante Anwendung von Computersimulationen Kenntnisse aus sehr unterschiedlichen Wissensgebieten zusammengeführt werden müssen. Vor allem die hohen Anforderungen an die Kenntnisse naturwissenschaftlicher Grundagentheorie aus den verschiedensten Bereichen und zusätzlich der Mathematik und Numerik bereiten vielen praxisorientierten Ingenieuren Schwierigkeiten.¹⁷ Anderen Akteuren wiederum fehlen die notwendigen tiefgehenden Kenntnisse von Programmiertechniken und Rechnerarchitekturen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, müssen neue Ausbildungsstrukturen entwickelt werden. So ist die oben erwähnte Mechatronik, in der Computersimulation einen integralen Bestandteil bildet, als neues ingenieurwissenschaftliches Fach mittlerweile an einigen deutschen Hochschulen eingeführt worden. Darüber hinaus zeugen zahlreiche Modellprojekte zur Umstrukturierung des Ingenieurstudiums in Richtung auf Simulationstechniken von der Schwierigkeit, dieses Gebiet innerhalb des klassischen ingenieurwissenschaftlichen Fächerkanons zu behandeln.¹⁸

15 So wurde z. B. am hochschuldidaktischen Zentrum der RWTH Aachen ein virtuelles Lernsystem für das Laserschweißen entwickelt. Vgl. Nalden (1999) und www.hdz-ima.rwth-aachen.de/forschung/projekte/lasim/index.html.

16 Reinhart/Feldmann (1997, S. 14).

17 So wurde auf dem 1997 an der TU-Darmstadt durchgeführten Kongreß zur rechnergestützten Modellbildung von vielen Vortragenden beklagt, daß es an fähigen Modellierern mangle und die Modellierung komplexer Systeme zuviel Zeit in Anspruch nähme.

18 So wurde z. B. an der Universität Paderborn ein Projekt namens „Painless Mechatronics“ durchgeführt. Darin wurde versucht, den Studierenden mit computergestützten Lerntechniken den Einstieg in die Mechatronik zu erleichtern.

Zusätzlich wird versucht, die Anwendung von Modellierung und Simulation durch Systematisierung und Automatisierung zu vereinfachen.¹⁹ Viele kommerzielle Simulations-Software Pakete enthalten mittlerweile Funktionen zur Unterstützung der Modellierung. So werden etwa Modellbibliotheken zur Verfügung gestellt oder ganze Expertensysteme integriert, die den Modellierungsvorgang anleiten.²⁰

In der Industrie besteht eine Tendenz dazu, Computersimulationen von spezialisierten „Berechnungsingenieuren“, durchführen zu lassen. Mittlerweile existiert eine Vielzahl von Ingenieurbüros, die auf Computersimulation spezialisiert sind und von verschiedenen Firmen mit computergestützten Berechnungen beauftragt werden. In großen Firmen sind die „Simulierer“ häufig in eigenen Abteilungen zusammengeschlossen. In der schon mehrfach zitierten „Studie zum Stand der Simulationstechnik“²¹ gaben nur 41% der Anwender von Simulationen mit der in Abschnitt 3.4 untersuchten Methode der Finiten Elemente an, die Simulationen von der betroffenen Fachabteilung (also den Entwicklungsingenieuren) selbst durchführen zu lassen. Weitere 35% hatten eine eigene Simulationsabteilung gegründet und 24% hatten einen externen Dienstleister hinzugezogen.

2.4 Bedeutung der Software

Simulationstechniken werden in den Ingenieurwissenschaften in den meisten Fällen mit der Hilfe von kommerzieller Simulations-Software angewendet. Solche Simulationswerkzeuge weisen in der Regel, graphisch orientierte Bedienoberflächen für die Modellierung und Simulation auf. Beispiele für solche Oberflächen von Simulationsprogrammen zeigen die Abbildungen 1, 2 und 3. Häufig stehen Bausteinbibliotheken zur Verfügung, in denen fertige Modellteile zusammengestellt sind, die miteinander verknüpft werden können. Je nach Abstraktionsgrad und Spezialisierung kann es sich um mathematische Bausteine (z. B. Addierer) oder schon um konkrete technische Elemente, wie die in Abbildung 3 gezeigten Getriebekomponenten, handeln. Viele der zur Modellierung und Simulation benötigten Algorithmen wie numerische Integrationsverfahren oder Trainingsregeln für konnektionistische Modelle sind in den Programmen fest implementiert und brauchen nur aufgerufen zu werden. Diese einfache Verfügbarkeit komplexer Verfahrensanteile verleiht industriellen Anwendungen von Computersimulation ein hohes Maß an Beschleunigung. Andererseits reduzieren sich die Möglichkeiten des Verfahrens auf die von der Software angebotenen Varianten. Schwierigkeiten treten dabei vor allem dann auf, wenn die Software nicht von Fachleuten des zu behandelnden Anwendungsgebiets, sondern von Programmierern ohne spezifische technische Ausrichtung entwickelt wurde, wie es häufig der Fall ist. Die verschiedenen Simulationsprogramme unterscheiden sich vor allem durch ihre Spe-

19 Vgl. z. B. Isermann (1997, S. 3): „Die Modellierung selbst erfolgt hierbei aber immer noch durch ‘Denkarbeit’ nach den erlernten Regeln der Physik. Dies ist wohl der Grund dafür, daß viele modellgestützte Methoden z. B. der Automatisierungstechnik in der Praxis viel zu wenig eingesetzt werden. Denn Modellbildung setzt ein gewisses ‘Können’ voraus und ist eine ‘erlernte Kunst’, die man schnell vergißt, wenn man nicht in Übung bleibt. Außerdem ist sie aufwendig und wegen des erforderlichen Zeitaufwandes oft zu teuer. [...] Hier könnten nur rechnergestützte Methoden der Modellbildung Abhilfe schaffen, bei denen man einen großen Teil der Kopfarbeit in den Rechner verlagert ...“.

20 Ein Beispiel aus dem Bereich der Verfahrenstechnik ist die an der RWTH-Aachen entwickelte Modellierungsssoftware „Modkit“, vgl. Marquardt (1997). Hier wird die Modellierung durch „Entscheidungsunterstützung“ über Hypertextlinks geführt.

21 Reinhart/Feldmann (1997, S.31).

2.4 Bedeutung der Software

zialisierung (einige sind speziell für bestimmte Branchen konzipiert, andere wiederum sind sehr allgemein gehalten) und den Umfang der integrierten Methoden. Innerhalb der in Kapitel 3 durchgeführten Untersuchungen der einzelnen Modellierungstechniken wird die Umsetzung der geschilderten Verfahrensweisen in kommerzielle Software-Pakete immer wieder eine Rolle spielen. Vor allem im Zusammenhang mit der Frage nach der wissensstrukturierenden Wirkung von Computersimulation wird dieser Gesichtspunkt von Bedeutung sein.

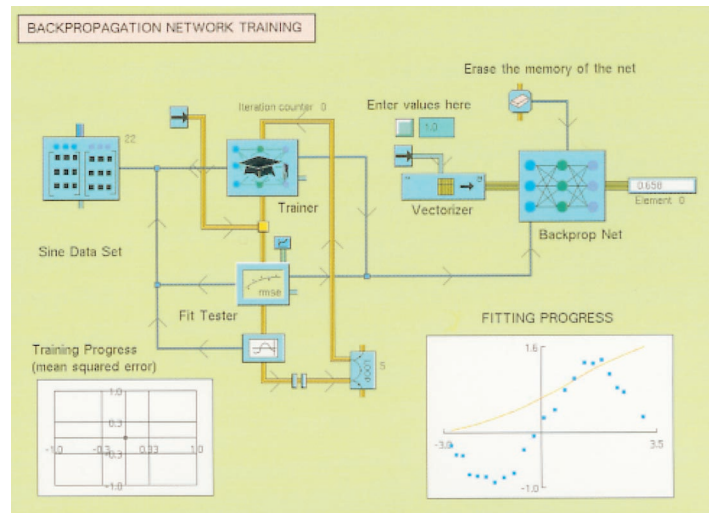


Abbildung 1 Oberfläche einer Software zur Unterstützung von konnektionistischer Modellierung (NeurOn-Line der Firma Gensym). Quelle: Prospekt der Firma Gensym von 1996.

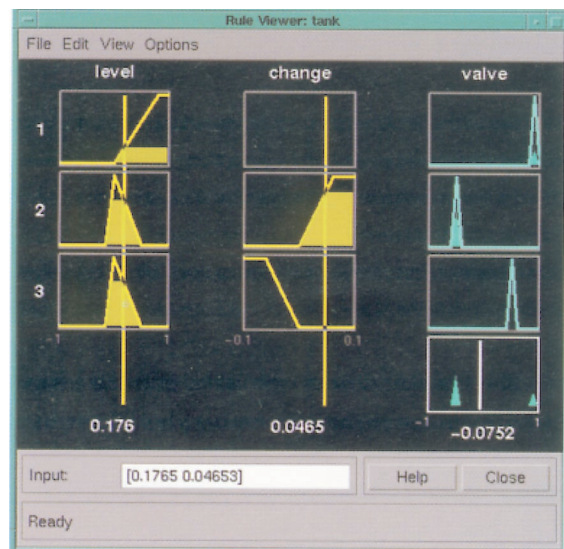


Abbildung 2 Oberfläche einer Fuzzy-Modellierungssoftware (Fuzzy Logic Toolbox des Programmpaketes MATLAB® der Firma The MathWorks Inc.). Quelle: MATLAB (1995, S. 5)

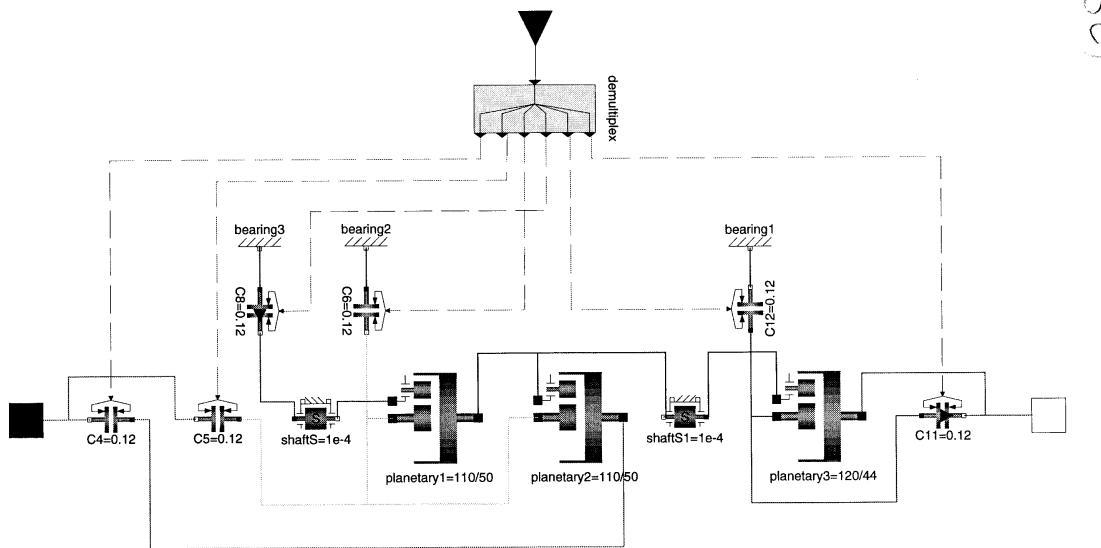


Abbildung 3 Modell eines Fahrzeugantriebs mit Getriebe, symbolisiert auf der Bedienoberfläche einer Software zur mathematischen Modellierung dynamischer Systeme („Dymola“). Die einzelnen Symbole eines solchen Modells können aus speziellen Bausteinbibliotheken auf die Oberfläche gezogen und miteinander verbunden werden. Das Programm bildet dann selbstständig die Modellgleichungen. Quelle: Otter (1997).

2.5 Bedeutung der Visualisierung

Die Visualisierung der erzielten Ergebnisse ist ein zentraler Bestandteil jeder Computersimulation. Vor allem Verfahren, die auf räumlich ausgedehnten analytischen Modellen beruhen, wie die Methode der Finiten Elemente, sind auf Visualisierungsstrategien angewiesen, wenn sie praxisrelevant eingesetzt werden sollen. Der Grund hierfür ist, daß die ursprünglich kontinuierlichen Gleichungen zur numerischen Behandlung mit dem Computer diskretisiert werden müssen. Das Ergebnis einer Simulationsrechnung ist daher keine Formel, die – zumindest von den beteiligten Fachleuten – direkt interpretiert werden könnte, sondern eine große Menge einzelner Zahlenwerte. Jeder dieser Zahlenwerte ist das Rechenergebnis für eine Zustandsgröße des Systems (z. B. Temperatur oder Spannung) an einem bestimmten Punkt. Spezielle in die Simulationsprogramme eingebaute Verfahren generieren aus den Datenkolonnen anschauliche Computergraphiken, indem sie die abstrakten Gleichungsergebnisse nach festen Transformationsregeln in eine Bildschirmdarstellung übersetzen. Dieser Vorgang dauert oft länger als die eigentlichen Berechnungen und stellt höhere Anforderungen an die Rechnerkapazitäten. Die Visualisierung ist keinesfalls nur ein Hilfsmittel bei der Präsentation von Simulationsergebnissen nach außen, sondern sie ist für die Simulationsanwender selbst zur Interpretation der Ergebnisse unerlässlich. Die Fähigkeit, Computergraphiken zu interpretieren, wird somit zu einem wichtigen Bestandteil der Gewinnung technologisch verwertbaren Wissens. Gleichzeitig übernehmen Simulationsbilder eine zentrale Funktion bei der Vermittlung technikkwissenschaftlicher Weltbilder. Diese verschiedenen Aspekte der Bildproduktion über Computersimulationen werden in Kapitel 4 dieser Arbeit untersucht.

2.6 Die wechselseitige Abhängigkeit zwischen Rechnertechnik und Computersimulation

In Publikationen zur Anwendung von Computersimulation in Naturwissenschaft und Technik wird immer wieder betont, wie sehr die Fortschritte der Simulationstechnik auf die Entwicklung im Bereich der Höchstleistungsrechner (Supercomputer) angewiesen sind.²² Ursache für diesen engen Zusammenhang ist die enorme Rechenintensität numerischer Verfahren. Einerseits sind hohe Rechengeschwindigkeiten vonnöten, um Simulationen in sinnvoller Zeit durchführen zu können. So sollte die Simulation einer Unwetterbildung abgeschlossen sein, bevor das Unwetter eintritt. Andererseits benötigen die unzähligen Daten, die bei Simulationen mit realitätsnahen Auflösungen der behandelten Bereiche anfallen, hohe Speicherkapazitäten. Schnellere Rechner mit größeren Kapazitäten ermöglichen feinere Gitter oder bessere Gleichungsapproximationen und damit genauere Ergebnisse. In der Entwicklung der Computertechnik ist das Anliegen der Simulation von Anfang an ein wesentlicher Motor der Entwicklung gewesen und hat vor allem in der ersten Zeit die massive staatliche Förderung der Entwicklung von immer leistungsfähigeren Rechnern angetrieben. So wurden die ersten Supercomputer in den USA fast ausschließlich zu Zwecken der numerischen Simulation in den Kernwaffenforschungslaboren Los Alamos und Livermore eingesetzt, so daß deren Anforderungen an die Rechnertechnik die Entwicklung dieser Technologie maßgeblich beeinflussten.²³ Auch für die Anschaffung der teuren Rechenanlagen für das wissenschaftliche Rechnen durch staatliche Einrichtungen wie Forschungszentren und Universitäten war die ingenieurwissenschaftliche Simulation stets ein Hauptargument. So wurde für die Universität Stuttgart vom Land Baden-Württemberg ein Supercomputer (Cray 1) für 5 Millionen Dollar und später das Nachfolgemodell (Cray 2) für 50 Mio Dollar angeschafft. 1988-1990 wurde das Hochschulrechenzentrum der Universität Aachen für 60 Mio. Dollar mit Rechenanlagen ausgebaut.²⁴ In beiden Fällen war die Nutzung durch die ingenieurwissenschaftlichen Fakultäten zur Simulation physikalisch technischer Systeme das hauptsächliche Anliegen.

2.7 Laborzurichtungen und Laborausweitungen – Erste Thesen über die Zusammenhänge

Alle bisherigen Beobachtungen deuten darauf hin, daß Computersimulation materielle Strukturen auf eine neue Weise für verschiedene Verarbeitungen verfügbar macht

22 Vgl. z. B.: Kaufmann/Smarr (1992, S. 15): „Das unersättliche Verlangen nach immer schnelleren Supercomputern ist unmittelbare Folge des Wunsches, bei unveränderter Rechenzeit immer komplexere und realitätsnähere Ergebnisse berechnen zu können. Seit über 50 Jahren wird daher jede neue Supercomputer-Generation sehnsüchtig erwartet.“

Graves (1982, S. 26): „Future CFD [Computational Fluid Dynamics P.W.] advances are going to be driven by new technological advances in the computer industry.“

Chapman (1979, S. 1310): „Such a capability [neuer Supercomputer P.W.] would make practical, for example, three dimensional Reynolds averaged simulations of the flow over turbomachinery components, helicopter rotor blades, and aircraft configurations.“

Trottenberg (1999, S. 6): „Erst seit etwa zwanzig Jahren sind Superrechner so leistungsfähig, daß die Simulation weniger Zeit erfordert als die Wetterentwicklung selbst. Hierdurch ist eine realistische computergestützte Wetterprognose überhaupt erst möglich. Das simpelste Beispiel eines qualitativen Durchbruchs.“

23 Vgl. MacKenzie (1996).

24 Vgl. Kaiser (1997, S. 368).

und so der Mobilisierung von Menschen und Dingen bei der Gestaltung technischer Systeme neue Dimensionen eröffnet. Im folgenden sollen aus den vorangegangenen Ausführungen einige vorläufige Thesen darüber abgeleitet werden, in welche Richtung diese Verschiebungen gehen könnten. Die weiteren Teile der Arbeit werden dann die Stichhaltigkeit dieser Thesen ergründen. Vor allem wird sich zeigen, ob sich die Vermutungen auch im Hinblick auf nicht rein analytisch basierte Modellierungstechniken wie die konnektionistische und die Fuzzy-Logik-Modellierung halten lassen.

Zu Beginn dieser Arbeit wurde ausgeführt, daß Computersimulation in dieser Arbeit als ein strukturierendes Element im Prozeß der Generierung von Wissen, das sich in technischen Artefakten objektiviert, verstanden wird. Aus den Ausführungen dieses Kapitels haben sich erste Hinweise darauf ergeben, wie diese Strukturierung vor sich gehen könnte. Es zeigte sich, daß die analytische Modellierung an sich ein Verfahren ist, das sich nicht ohne Brüche in traditionelle ingenieurwissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen einfügt. Die geschilderten Versuche zur Automatisierung von Modellbildung durch Expertensysteme als einer „Schwachstelle der Technikentwicklung“, sowie die Tendenz zur Übertragung von Simulationen an Spezialisten in vielen Unternehmen illustrieren dieses Spannungsverhältnis. Als wesentliches strukturierendes Element kann hier die Modellierungssprache, in der bei einer Computersimulation jegliches Wissen formuliert werden muß, vermutet werden. Auf die Strukturierungen durch den Modellierungsansatz setzen, wie in Abschnitt 2.4 deutlich wurde, nochmals die Vorgaben auf, die von der zur Unterstützung der Modellierung eingesetzten Software gemacht werden. Außerdem wird, wie in Abschnitt 2.5 angedeutet, über die rechnergestützte Visualisierung die Wahrnehmung der behandelten Realitätsausschnitte strukturiert.

Erste Folgerungen lassen sich auch darüber ziehen, welche Verschiebungen bei der Generierung technikwissenschaftlichen Wissens mit dem Einzug von Computersimulation in den technikwissenschaftlichen Methodenkanon verbunden sind. So können etwa Veränderungen in der Vermittlung und Personenbindung des Wissens vermutet werden. Computersimulation transportiert zumindestens den Anspruch darauf, ein zwar schwieriges aber dennoch vollständig explizierbares und aus den Regeln naturwissenschaftlicher Theoriebildung herleitbares Wissensgebiet darzustellen. Ihre Vertreter postulieren teilweise, daß im Zuge ihrer Verbreitung ein Teil des in der Technikentwicklung notwendigen personengebundenen Erfahrungswissens durch allgemein zugängliche oder sogar automatisierbare Algorithmen ersetzt werden kann. Andererseits ist gerade im Bereich der Modellierung der Ruf nach erfahrenen Experten besonders stark. Weiter werden für die Durchführung von Computersimulationen Wissensanteile aus Bereichen benötigt, die vorher nur marginalen Anteil an der Technikentwicklung hatten. Auffällig ist es, daß in den Ingenieurwissenschaften vor allem auch solche Anteile an Bedeutung gewinnen, die in vielen anderen Fachgebieten ebenfalls immer stärker gefragt sind. Dieses Phänomen hängt sicherlich mit der Universalität des Computers als Wissenswerkzeug zusammen. Insgesamt kann vielleicht vermutet werden, daß sich ein neuer Wissenskomplex herausbildet, der zwar ebenso viele heterogene Bestandteile enthält wie die klassische Technikwissenschaft, aber besser an die bestehenden Strukturen der Wissensverwertung in Industrie und Universität angepaßt ist.²⁵ So zieht die Verbreitung der neuen Wissenstechnik eine Aufteilung des zuvor in der Person des „Entwicklungsingenieurs“ integrierten

Wissensgebietes an verschiedene Expertengruppen nach sich. Das Wissen einer solchen Expertengruppe kann innerhalb des universitären Ausbildungssystems gezielter vermittelt werden, als personengebundenen Wissen, das zudem sehr von seinen lokalen Entstehungsbedingungen abhängt. Außerdem kommt der starke Bezug auf naturwissenschaftliche Grundlagentheorie zusammen mit der Anknüpfung an die Informatik dem Streben ingenieurwissenschaftlicher Fachbereiche nach Wissenschaftlichkeit und akademischer Anerkennung entgegen. Die genannten Umstrukturierungen in den Beziehungen verschiedener Gruppen von Wissensträgern müssen jedoch Vermutungen bleiben, solange sie nicht von empirischen Untersuchungen bestätigt werden.

Dagegen können Aussagen über charakteristische Eigenschaften des erzeugten Wissens sehr wohl aus prinzipiellen Erwägungen über diese Wissenstechniken getroffen werden. Daraus wiederum können Vermutungen zu Knotenpunkten des Zusammenwirkens sozialer und materieller Strukturen in der computergestützten Technikentwicklung abgeleitet werden. So hat sich gezeigt, daß mit der Hilfe von Computersimulationen spezifischere und detailliertere Aussagen über das Verhalten materieller Strukturen gewonnen werden, als dies zuvor möglich war. Auf der Grundlage dieses Wissens können technische Systeme in neue Grenzbereiche vorstoßen und spezieller auf bestimmte Kriterien hin ausgelegt werden können. Daraus läßt sich in mehrerer Hinsicht ein Veränderungspotenzial für die Generierung soziotechnischer Strukturen ableiten. Zum Einen erweitern sich die Möglichkeiten, spezifische technische Lösungen für eine Vielzahl verschiedener Anforderungen zu entwickeln. Damit stellen sich vermehrt Fragen der Bestimmung von Kriterien für die Gestaltung technischer Artefakte. Dabei kann vermutet werden, daß sich solche Fragen im Prozeß der Technikentwicklung zu anderen Zeitpunkten und in anderer Weise stellen als zuvor. Hier ist zu fragen, inwieweit die Simulationsverfahren für verschiedene Gruppen von Akteuren Eingriffsmöglichkeiten bieten oder ob die mit ihrem Einsatz verbundenen Strukturierungen für manche Beteiligte das Mitsprechen erschweren. Zum Anderen wird durch die Methode der Computersimulation die Art und Weise mitbestimmt, wie technische Systeme mit ihrer Umgebung zusammenwirken, so etwa wie sie überwacht und bedient werden müssen. Um die Übereinstimmung mit der Simulation abzusichern, müssen gezielte Umformungen der Realität vorgenommen werden. Damit ziehen die Veränderungen in der Methodik zur Generierung technologisch verwertbaren Wissens Umstrukturierungen der sozialen und natürlichen Umwelt technischer Artefakte nach sich. Dieses Phänomen der „Realisierung“ von Laborergebnissen durch Umformung der Welt nach den Vorgaben des Labors wurde in Abschnitt 1.4 in Anlehnung an Bruno Latour als „Ausweitung des Labors auf die Welt“ gekennzeichnet. Aus der Perspektive einer gesellschaftswissenschaftlichen Technikforschung ist es dabei wichtig zu fragen, welche Form und welches Ausmaß diese Umformungen annehmen. Zudem ist es für die Möglichkeiten einer Einbindung materieller Artefakte in soziotechnische Strukturen von Interesse, wie flexibel die technischen Systeme gegenüber verschiedenen Nutzungen sind, wie sie auf veränderte Einsatzbedingungen reagieren und wie transparent ihre Funktionsweise für ver-

25 Hack und Hack (1985, S. 345) weisen in ihrer Untersuchung der industriellen Verwertung chemischer Theorien darauf hin, daß bei der Generierung neuer Wissensformen zwar immer auch neues Erfahrungswissen entsteht, dieses aber dann von vorneherein besser als das alte Erfahrungswissen in die bestehenden Verwertungskontexte eingebunden ist.

schiedene Akteursgruppen ist. Damit lassen sich aus den bisherigen Ausführungen zu den Eigenschaften von Computersimulation einige Leitfragen ableiten, mit denen Umschichtungen soziotechnischer Strukturen, wie sie mit dem Einsatz von Computersimulation möglicherweise einhergehen, analysiert werden könnten. Alle Modellierungsverfahren, die in Kapitel 3 untersucht werden, sollen daraufhin befragt werden, wie sich die mit ihrer Hilfe entwickelten technischen Systeme hinsichtlich der im folgenden aufgeführten Merkmale beschreiben lassen:

- Flexibilität gegenüber unvorhergesehenen Einwirkungen und verschiedenen Einsatzweisen
- Erforderliche Umformungen anderer Strukturen bei ihrer Verwirklichung
- Notwendige Kontrolle der Umgebung bei ihrem Betrieb
- Eingriffsmöglichkeiten in die Entwicklung und Bedienung
- Transparenz der Funktionsweise

Dabei ist es offensichtlich, daß diese Eigenschaften nicht in abstrakter Weise bestimmt werden können. Vielmehr muß immer auch konkret gefragt werden, für welche Gruppen von Akteuren sie sich in welcher Weise darstellen. So ist es durchaus denkbar, daß eine Modellierungstechnik zwar für bestimmte Gruppen von Experten eine höhere Transparenz der entwickelten Technologie eröffnet, anderen Personengruppen aber den Zugang zu einem Verständnis der Funktionsprinzipien erheblich erschwert.

3 Wie die Welt in den Computer kommt – Die einzelnen Modellbildungsansätze

3.1 Vorüberlegungen

Grundlage einer jeden Computersimulation ist ein im Computer implementiertes Modell des zu untersuchenden Weltausschnittes. In diesem Kapitel werden drei verschiedene Ansätze, mit denen Modelle für Computersimulationen innerhalb von Technikentwicklungen erstellt werden, vorgestellt und analysiert. Dabei kann es nicht das Ziel sein, die verschiedenen Modellierungsansätze in ihren theoretischen Grundlagen und ihrer Anwendung erschöpfend zu beschreiben. Solche technisch orientierten Darstellungen finden sich in der Fachliteratur, auf die hier an den entsprechenden Stellen verwiesen wird. Stattdessen sollen die verschiedenen Verfahren unter einem systematisierenden Blick betrachtet werden, dem sie in den ingenieurwissenschaftlichen Publikationen nur in geringem Maße oder gar nicht unterworfen werden. Dieser Blick ergibt sich aus dem in Kapitel 1 ausführlich diskutierten Ansatz dieser Arbeit, ingenieurwissenschaftliche Methoden als Verfahrensweisen zu begreifen, die einerseits das Zusammenspiel zwischen technischen und gesellschaftlichen Strukturen wesentlich mitformen, andererseits aber selbst durch ein gemeinsames Wirken sozialer und technischer Strukturierungen geprägt sind. Entsprechend dem dort entwickelten Modellbegriff sollen die mit den vorgestellten Verfahren entwickelten Modelle als „Instrumente zur Intervention in die Welt“ beschrieben werden. Der Fokus der Darstellung ist daher auf die Rolle der Modelle als Hilfsmittel bei der Produktion von wirkmächtigem Wissen und auf ihre Funktion als Vermittler zwischen technischer und gesellschaftlicher Rationalität. Um dieser Perspektive gerecht zu werden, genügt es nicht, den Blick allein auf das „mathematische Modell“ als dem Endprodukt des Verfahrens zu richten. Erst wenn der gesamte Dekontextualisierungsvorgang der Modellierung zusammen mit den zugehörigen Rekontextualisierungen betrachtet wird, kann die wirklichkeitsproduzierende Dimension von Computersimulation in der Technikentwicklung erfaßt werden. Die zu beschreibenden Aktivitäten innerhalb der Modellbildung reichen von der Abgrenzung des Weltausschnittes, den das Modell repräsentieren soll, über die computergerechte Formalisierung des Modells, bis hin zur Validierung durch die Konzeption von Testfällen und Experimenten. Jeder Modellierungsschritt löst Elemente aus einem kontinuierlichen Kontext und stellt sie in einen neuen Zusammenhang. Zu diesem Zweck werden eine Reihe von „Übersetzungen“ vorgenommen. In jedem der einzelnen Übersetzungsschritte wird direkt oder indirekt ausgewählt, welche Elemente und Relationen beteiligt und welche ausgeschlossen werden. Diese Folge von kontingenten Transformationen wurde in Abschnitt 1.4 als „Rekonfigurationsvorgang“ interpretiert, in dessen Verlauf technische und gesellschaftliche Strukturen immer wieder neu verschränkt werden und sich schließlich in charakteristischer Weise gemeinsam stabilisieren. Wesentlich für diese Verfestigung ist neben der Verbreitung von repräsentativen Simulationsbildern, die in Kapitel 4 untersucht wird, die Implementation der „echten“ technischen Artefakte, die im Anschluß an die modellbasierten Simulationsexperimente beginnt. Wie in Kapitel 1 beschrieben, wird die Verbreitung der simulierten technischen Systeme in der Welt als „Rekontextualisierung“ aufgefaßt, für deren Gelingen ein hohes Maß an Kontrolle der Außenbedingungen vonnöten ist. Es wurde vermutet, daß sich in diesem Zusammenhang zwischen Formalisierung und technischer Kontrolle die Stabilisierung eines spezifischen technisch gestützten Dispositivs manifestiert. Um diesen vermuteten Zusammenhang aufzuweisen, muß in den hier beschriebenen Anwendungsbeispielen immer wieder gefragt werden, wie sich die

simulierte Technik in gesellschaftliche Verwendungs- und Verwertungskontexte einbindet. Daher gilt es in den Blick zu bekommen, welcher Gewinn der Produktion technikwissenschaftlichen Wissens durch den Transfer in das Computerlabor entsteht. Entsprechend müssen die in der Modellierung involvierten Transformationen von Weltausschnitten als zweckgebundene Übersetzungen erfaßt werden.

Computersimulationen erfüllen – so die in Abschnitt 1.4.2 entwickelte These – die beschriebene Funktion als Vermittler zwischen gesellschaftlichen Strukturen und materiellen Zusammenhängen indem sie die Generierung und Anwendung menschlichen Wissens über Welt strukturieren. Um die Funktionsweise dieser Strukturierungen beschreiben zu können, muß der Vorgang der Modellierung als ein Prozeß der Generierung, Verarbeitung und Anwendung menschlichen Wissens über Welt untersucht werden. Im Verlauf dieses Verarbeitungsprozesses wird lokales, punktuell personengebundenes Wissen verobjektiviert und als Bestandteil technischer Artefakte universalisiert. Dabei steht das Modellierungsverfahren dem einzelnen Akteur als strukturierende Instanz gegenüber. Der in Abschnitt 1.4.2 eingeführte soziologische Wissensbegriff, soll hier angewendet werden, um Verschiebungen dieser Strukturierungen in ihrer gesellschaftlichen Bedeutung beschreiben zu können.

Diese doppelte Dimension von Modellierung als ein Umschichtungsvorgang sozio-technischer Strukturen soll in den folgenden Beschreibungen der einzelnen Verfahren im Mittelpunkt stehen. Obwohl dieser Ansatz für alle Arten von technikwissenschaftlicher Computersimulation gleichermaßen greift, halte ich es für sinnvoll, spezifische Verfahren ausführlich zu untersuchen. Denn wenn auch für jedes Modell die Beschreibung als Instrument zum Eingriff in Welt und als wissensstrukturierendes Werkzeug im Grundsatz zutreffen mag, so handelt es sich doch bei den unterschiedlichen Verfahren der Modellbildung um jeweils eigene Strategien, dieses Instrument einzusetzen. Jede dieser Strategien wiederum – so zumindestens die Vermutung – beinhaltet charakteristische Vernetzungen zwischen materiellen Komponenten und sozialen Strukturen. Diese Divergenz macht es gerade möglich, die vielfache Bedingtheit technischer Methoden aufzuzeigen. Allein die Existenz so völlig unterschiedlicher Verfahren der Formalisierung von Welt zu Zwecken der Technikentwicklung zeigt, daß niemals rein technische Erklärungen für die Richtung technologischer Entwicklungen ausreichen können. Daher sollen in den folgenden Darstellungen sowohl die Eigenheiten der einzelnen Ansätze als auch der verbindende Instrumentcharakter herausgearbeitet werden.

3.2 Modellierungsansätze – Unterscheidungen und Klassifikationen

Ziel einer jeden Modellierung ist es, ein System, das technisch verarbeitet werden soll, in einer formalen Sprache zu beschreiben. Aus dieser Beschreibung können dann Aussagen über das System gewonnen werden, die für die Technikentwicklung von Interesse sind. Für Modellierungen, die als Grundlage für Computersimulationen dienen sollen, muß die Formalisierung eine Implementierung des Modells in einem Rechner ermöglichen. In der Regel handelt es sich bei den modellierten Zusammenhängen um „dynamische Systeme“. Von dynamischem Systemverhalten spricht man, wenn gegenwärtige Einwirkungen auf das System Auswirkungen in der Zukunft haben, was für reale physikalische Systeme immer der Fall ist. Ein dynamisches Modell enthält also Annahmen über das zeitliche Verhalten eines Systems.¹

Bei der Modellierung kann zwischen der Frage nach der Art der Gleichungen also der Modellstruktur (Strukturidentifikation) und der nach den konkreten Zahlenwerten für die Koeffizienten der Gleichungen (Parameteridentifikation) unterschieden werden. In den Ingenieurwissenschaften ist es, wie schon in Kapitel 1 erwähnt wurde, üblich, zwischen „Black-Box“ und „White-Box“ Modellen zu differenzieren. White-Box Modelle entstehen durch „theoretische Modellbildung“. Darunter wird die Deduktion des Modells aus den entsprechenden physikalischen Gesetzen verstanden. Dabei muß bekannt sein, wie das System aufgebaut ist und welche Prozesse das Systemverhalten beschreiben. Die wesentlichen Prozesse des Systems müssen einer naturwissenschaftlichen Beschreibung zugänglich sein. In einem White-Box Modell ist sowohl die Struktur des Systems (also sein Aufbau und die Wirkungsübertragungen in seinem Inneren) als auch der Parametersatz (alle Zahlenwerte, die das Modell enthält) explizit enthalten. Die Modellstruktur soll die Struktur des realen Systems hinsichtlich aller relevanten Eigenschaften abbilden und auch die Parameter lassen sich dort lokalisieren. Beides muß in dem Prozeß der Modellbildung bestimmt (also z. B. hergeleitet, gewählt oder gemessen) werden. Da es niemals möglich ist, alle Aspekte eines realen Systems mit naturwissenschaftlichen Gesetzmäßigkeiten zu erfassen und in einem einzigen System mathematischer Gleichungen zu beschreiben, beinhaltet die theoretische Modellierung immer eine Vielzahl von bewußt getroffenen qualitativen Annahmen über das System (z. B. „der Außendruck spielt für das Systemverhalten keine Rolle“, „die Masse wird vernachlässigt“ etc.).

Ein Black-Box Modell entsteht auf eine vollkommen andere Weise. Hier wird bei der Modellierung nicht von übergeordneten allgemeingültigen Gleichungen ausgegangen, sondern induktiv aus der Analyse eines konkreten Systems auf das Modell geschlossen. Daher ist auch kein Wissen über die physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die dem Systemverhalten zugrunde liegen könnten, notwendig. Statt der „inneren Struktur“ des untersuchten Systems wird von einem solchen Modell nur der Zusammenhang zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen des Systems beschrieben. Modellierungsverfahren, mit denen Black-Box Modelle entwickelt werden, bezeichnet man auch als „modellfreie Methoden“, da das Systemverhalten zwar nachgebildet, aber kein explizites Modell über das Zustandekommen dieses Verhaltens aus der Struktur des Systems gewonnen wird. Bei der Black-Box Modellierung stellen sich einige Probleme anders als bei der deduktiven Modellierung. Dies gilt vor allem für die Frage nach dem Gültigkeitsbereich des Modells. Da kein systembezogenes Strukturwissen vorliegt, können die Ergebnisse aus Black-Box Modellierungen nicht beliebig extrapoliert werden. Konnektionistische Systeme, wie sie in Abschnitt 3.6 vorgestellt werden, sind typische Black-Box Modelle.

Die aufgeführten Charakteristika der Modellierungsverfahren beeinflussen es, welche Art von Wissen produziert werden kann und wie sich dieses für die Behandlung technischer Systeme ausnutzen läßt. So ist es nur mit einem analytisch basierten „White-Box“ Modell möglich, gezielte Modifizierungen an einem technischen Artefakt vorzunehmen, um sein Verhalten in berechenbarer Weise zu beeinflussen. Nur ein „lern-

1 Dynamische Systeme enthalten Energiespeicher, deren Eigenschaften die Systemdynamik bestimmen. Einige Systeme nehmen nach einer gewissen Zeit wieder einen Ruhezustand ein (stationärer Zustand). Werden nur die Ruhezustände in Abhängigkeit von den Systemparametern untersucht, spricht man von einer Analyse des statischen Verhaltens. Simulationen zielen in den allermeisten Fällen auf das dynamische Verhalten und beruhen auf dynamischen Modellen.

fähiges“ Modell wie etwa ein „Künstliches Neuronales Netz“ ist in der Lage, sich einem Prozeß anzupassen, der sich im Verlauf der Zeit verändert.

Auf diese Weise werden Eigenschaften technischer Artefakte, die in Abschnitt 2.7 als relevant für ihre Einbindung in soziotechnische Strukturen genannt wurden, mit der Wahl der Modellierungsmethodik beeinflusst. So hängt es unter Umständen von dem Modellierungsansatz ab, welche Transparenz ein technisches System später aufweist, in welcher Hinsicht steuernde Eingriffe vorgenommen werden können und auf welche Weise die Bedienung des Systems vor sich geht. Außerdem wird vorgeprägt, in welchem Bereich das Modell später Gültigkeit beanspruchen kann. Damit bestimmt die Modellierungsweise die Flexibilität technischer Systeme gegenüber unterschiedlichen Verwendungszusammenhängen und Umgebungsbedingungen mit. Dies alles sind Eigenschaften technischer Artefakte, die in hohem Maße deren Vernetzung in gesellschaftliche Strukturen beeinflussen und Gegenstand politischer Kontroversen sind.

Im Hinblick auf die in Abschnitt 1.4.2 beschriebene Funktion technikwissenschaftlicher Modelle als Verarbeitungsinstanz von Wissen lassen sich aus den bisher dargestellten Unterscheidungen von Modellierungsansätzen ebenfalls erste Hinweise finden. Offensichtlich ist es nämlich der Fall, daß der Modellierungsansatz das Wissen, das in eine Technikentwicklung eingehen kann, erheblich strukturiert. So ist es z. B. kaum möglich, Wissen über physikalische Gesetzmäßigkeiten in eine konnektionistische Modellierung einzubringen. Sprachlich gefaßte Regeln dagegen können zwar in eine Fuzzy-Modellierung, nicht aber in ein analytisches mathematisches Modell eingehen. Sammlungen von Daten des „Ein- Ausgangsverhaltens“ eines Systems können nur von einer Black-Box Modellierung reibungslos verarbeitet werden. Solche Problemstellungen sind keineswegs von rein „technischer“ Natur. Vielmehr hängt die Frage danach, welche Art Wissen eingebracht werden kann, eng damit zusammen, welche Personenkreise mit welcher Ausbildung an der Entwicklung des Artefaktes beteiligt werden können oder sollen.

Die bisherigen Ausführungen bestätigen daher die Vermutung darüber, daß Modellierung und Computersimulation spezifische wechselseitige Zusammenhänge zwischen gesellschaftlichen Strukturen und technischem Instrumentarium in sich tragen. Diese Zusammenhänge sollen im folgenden für drei einzelne Modellierungsverfahren genauer analysiert werden. In Abschnitt 3.4 geht es mit der „Methode der Finiten Elemente“ um ein Verfahren, das wesentlich auf der Deduktion aus naturwissenschaftlicher Grundagentheorie und damit auf White-Box Modellen beruht. Die in Abschnitt 3.6 vorgestellte konnektionistische Modellierung liefert dagegen typische Black-Box Modelle. Die Fuzzy-Logik gestützte Modellierung, die in Abschnitt 3.5 behandelt wird, produziert Modelle, die sowohl induktive als auch deduktive Elemente enthalten.

Die vorgestellte Auswahl der zu untersuchenden Modellierungs- und Simulationsverfahren erfolgte nicht zufällig. Es handelt sich um Methoden, die in den Ingenieurwissenschaften schon seit längerer Zeit etabliert sind und mit der wachsenden Verfügung von Rechnerkapazitäten immer mehr an Bedeutung gewinnen. Die untersuchten Verfahren werden nicht nur für Spezialtechnologien sondern für eine breite Palette von Anwendungen eingesetzt. Außerdem werden drei verschiedenartige aber eng zusammenhängende Aspekte der Gestaltung technischer Systeme erfaßt. Zum Einen ist dies die Entwicklung und konstruktive Gestaltung technischer Artefakte, in der die Funkti-

onsprinzipien sowie der Struktur und Form festgelegt werden. Zum Anderen geht es aber auch um Konzepte für die elektronische Steuerung und Regelung technischer Systeme, die einen erheblichen Einfluß auf die Funktionsweise und die Vernetzung mit anderen technisch/gesellschaftlichen Strukturen haben. In sehr vielen Anwendungen computergestützter Simulationen geht es, wie schon in Abschnitt 2.2 ausgeführt wurde, mindestens ebenso sehr um die Entwicklung von Regelungskonzepten wie um die konstruktive Ausgestaltung der Bauteile. Beide Aspekte von Technikentwicklung werden durch Computersimulation stark verändert. Gerade im Bereich der Steuerung und Regelung technischer Systeme sind jedoch mit der Ausbreitung von Simulationsverfahren besonders einschneidende Umbrüche zu verzeichnen. Hier soll daher versucht werden, beiden Aspekten gerecht zu werden. Das bedeutet allerdings einen gewissen Spagat zwischen sehr unterschiedlichen Sphären ingenieurwissenschaftlicher Forschung und Praxis und erschwert eine einheitliche Begriffsbildung. Ich meine jedoch, daß es sich lohnt, beide Aspekte gleichermaßen im Blick zu behalten und dafür einige Inkonsistenzen in der Systematik in Kauf zu nehmen.

3.3 Vorüberlegungen zur analytischen Modellierung

In dem ersten Kapitel dieser Arbeit wurde ein mathematisches Modell, das einer Computersimulation zugrundeliegt, als eine *rechnerisch faßbare und in einem Digitalrechner verarbeitbare Beschreibung eines technisch interessierenden Zusammenhangs* beschrieben. Mathematische Modelle, die aus naturwissenschaftlichen Grundgleichungen deduktiv gewonnen werden, wurden als „analytische“ oder „fundamentale Modelle“ gekennzeichnet. Mit der Methode der Finiten Elemente (FEM) geht es hier um ein Simulationsverfahren, das auf solchen analytischen Modellen beruht.

In den Technikwissenschaften gibt es eine große Zahl unterschiedlicher Ansätze zur Bildung analytischer Modelle und deren Auswertung über Computersimulationen. Jedes dieser Verfahren beinhaltet spezifische Übersetzungen und Rekonfigurationen. Da diese Vielfalt unmöglich in diesem Rahmen ausgewertet werden kann, wurde die Methode der Finiten Elemente zur exemplarischen Untersuchung ausgewählt. Dieses Verfahren ist sicherlich das am weitesten verbreitete Simulationsverfahren in der Technikentwicklung überhaupt. Es wird im wesentlichen im Bereich der Konstruktion und Entwicklung eingesetzt und führt zu erheblichen Veränderung dieser Tätigkeiten und ihrer Produkte. Es soll jedoch versucht werden, aus den Analysen der FEM verallgemeinerbare Aussagen über die Simulation auf der Basis analytischer Modellierung als Vermittlungsinstanz bei der Produktion materieller Anteile in gesellschaftlichen Strukturen zu gewinnen. Trotz aller Unterschiede wird vermutet, daß sich jeweils ähnliche Zusammenhänge zwischen der Dekontextualisierung von Weltausschnitten und der Umformung von Welt, die bei der Implementation der auf der Basis dieser Formalisierungen durchgeführten Technikentwicklungen notwendig wird, ergeben. Denn bei aller Verschiedenheit der vorgestellten Simulationsbereiche und Methoden besteht eine Gemeinsamkeit. Ausgangspunkt sind stets die naturwissenschaftlich hergeleiteten Grundgleichungen des betreffenden Anwendungsbereichs. Um aus diesen allgemeinen Gleichungen zu einem mathematischen Modell eines konkreten Ausschnittes von Wirklichkeit zu gelangen, sind bestimmte Übersetzungs-

schritte vonnöten, die hier zunächst unabhängig von der Simulationsmethodik vorgestellt und interpretiert werden sollen.

Analytische Übersetzungen

Analytische mathematische Modelle repräsentieren das Verhalten dynamischer Systeme auf der Basis naturwissenschaftlicher Gesetze. Diese Gesetze beschreiben die Beziehungen der beteiligten Größen wie z. B. Temperatur, Druck, Dichte, Masse oder Impuls und werden in der Regel als Differentialgleichungen formuliert. Differentialgleichungen verknüpfen Funktionen dieser Größen und deren Ableitungen (Veränderungen in der Zeit oder über den Raum) miteinander. Sie lassen sich nicht direkt nach einer Größe auflösen. Stattdessen sind die Lösungen von Differentialgleichungen selbst Funktionen, die Werteverläufe der Größen angeben. Meist gibt es eine Vielzahl von Funktionen, welche die Differentialgleichung erfüllen und damit Teil des Lösungsraumes sind. Für die meisten naturwissenschaftlichen Differentialgleichungen sind nur einige wenige solcher „exakten Lösungen“ bekannt. In der Regel handelt es sich dann um spezielle Fälle, die starke Vereinfachungen der ursprünglichen Gleichungen beinhalten.² Auch aus solchen allgemeinen Lösungen von Differentialgleichungen lassen sich aber noch keine Aussagen über das Verhalten eines konkreten dynamischen Systems gewinnen. Damit aus einer Differentialgleichung ein Modell abgeleitet werden kann, das ein spezifisches System beschreibt, müssen Randbedingungen und Anfangsbedingungen angegeben werden. Randbedingungen kennzeichnen die durch das konkrete System vorgegebenen Einschränkungen³, während Anfangsbedingungen den Zustand der Variablen zu Beginn des interessierenden Geschehens beschreiben.

Unabhängig davon, ob die Modelle zur Computersimulation verwendet werden oder nicht, müssen auf dem Weg von der allgemeinen Differentialgleichung zum Modell eines konkreten Systems einige grundsätzliche Schritte durchgeführt werden. Im folgenden sollen diese allen analytischen Modellen gemeinsamen Übersetzungsschritte benannt werden.

Zunächst muß das zu untersuchende System von der Umgebung abgetrennt werden. Nicht nur für die analytische Modellierung sehr umfangreicher Weltausschnitte, wie etwa ganzer Ökosysteme, sondern auch schon bei der Beschreibung einzelner Maschinenteile, spielt die Festlegung der Grenzen zwischen System und Umgebung eine zentrale Rolle für die Aussagefähigkeit des Modells.⁴ Mit der Festlegung der Grenzen wird bestimmt, was zu dem System gehört und was als Umgebung gilt. Das zu betrachtende System wird aus der Umgebung herausgeschnitten.⁵ Diese bewußte Dekontextualisierung erfordert im nächsten Schritt, daß die Kopplung des isolierten

2 Beispiel: Die Navier-Stokes-Gleichungen beschreiben das Verhältnis von Trägheitskräften zu Volumen-, Druck- und Reibungskräften in inkompressiblen Flüssigkeiten als ein System von drei gekoppelten Differentialgleichungen. Damit ist im Prinzip jede inkompressible ebene Strömung beschreibbar. Es existiert jedoch keine allgemeine Lösung dieser Gleichungen. Lediglich für spezielle Fälle wie z. B. die „schleichende Strömung“ lassen sich Lösungsansätze angeben. Vgl. hierzu Gersten (1991, S. 118).

3 Zur Angabe einer Randbedingung muß das gesamte zu untersuchende Gebiet als mathematische Funktion beschrieben werden.

4 Zur Modellierung von Ökosystemen und den dabei auftretenden Abgrenzungsschwierigkeiten vgl. Bossel (1992, S. 18).

5 In der Mechanik spricht man vom „Freischneiden“ oder „Freimachen“ für die Grenzziehung bezüglich der mechanischen Größen.

Systems mit der von ihm abgetrennten Umgebung explizit festgelegt wird. Es muß entschieden werden, welche Einwirkungen aus der Umgebung in das Modell überhaupt einbezogen werden sollen und welche der ausgewählten Einflüsse als Störgrößen, welche als Eingangsgrößen zu betrachten sind.⁶ Solche Entscheidungen hängen wesentlich von dem Zweck der Modellierung ab und setzen schon Vorüberlegungen hinsichtlich der Bedingungen am Einsatzort voraus. Die Dekontextualisierung von Weltausschnitten ist somit als eine Übersetzung von Zwecken in formale Grenzziehungen zu verstehen. Bei einer späteren Implementierung der technischen Systeme, die auf der Grundlage solcher Modelle entwickelt wurden, muß die Einhaltung der gezogenen Grenzen garantiert werden. Wenn ein Einfluß aus der Umgebung nicht modelliert wurde, so muß er auch aus dem realen technischen System ferngehalten werden. Die Dekontextualisierung über die erste Grenzziehung ist somit schon ein ordnender Schritt, der im Hinblick auf den Zweck der Modellierung getroffen wird, aber auch schon Folgen für das Zusammenwirken des späteren realen technischen Systems mit seiner Umwelt hat. Als charakteristisch für die analytische Modellierung kann festgehalten werden, daß sie sehr frühzeitig explizite Grenzziehungen erzwingt. Allerdings ist auch hier nicht von einem rein vorwärtsgerichteten Vorgehen auszugehen. So kann es durchaus sein, daß die gezogenen Grenzen später verändert werden, wenn sich zeigt, daß die Berechnungen in dieser Form nicht anwendbar sind.

Die Grenzziehung zwischen System und Umgebung ist nicht der einzige zweckbestimmte Auswahlsschritt. Eine analytische Modellierung erfordert, daß vorab festgelegt wird, welche Aspekte des Systems überhaupt modelliert werden sollen. Das Modell soll nur diejenigen Eigenschaften des Systems abbilden, die Wirkungen übertragen, die bei der technischen Verarbeitung des Systems interessieren (z. B. die Übertragung von Impuls in einer Strömung, aber nicht die Änderung der Farbe der Flüssigkeit). Die behandelten Bereiche werden somit im Verlauf der Modellierung auf eine Weise rekonstruiert, die sie in einem bestimmten Kontext und zu bestimmten Zwecken technologisch verarbeitbar macht. Eine zu genaue Modellierung, die „überflüssige“ Details berücksichtigt, verteuert und verlängert die Entwicklung. Die Auswahl der zu modellierenden Aspekte wird häufig als ein von dem vollständigen Modell ausgehender Vorgang beschrieben. So schreibt z. B. Hartmut Bossel, ein Grundlagentheoretiker der mathematischen Modellierung dynamischer Systeme:

„Wie die Aufgabenstellung den Modellzweck bestimmt, so bestimmt diese wiederum Art und Umfang der Modellformulierung. Daraus folgt, daß das gleiche System für unterschiedliche Modellzwecke durch unterschiedliche Modelle abgebildet werden muß. Da eine 1:1 Abbildung von System zu Modell im Allgemeinen (außer in einfachsten Fällen) unmöglich ist, ermöglicht erst die von dem Modellzweck erzwungene Fokussierung auf gewisse Aspekte eine effiziente und knappe Darstellungsweise.“ Bossel (1992, S. 28)

Folgerichtig spricht Bossel auch bei der Bewertung von Modellen nicht von Richtigkeit sondern von „Gültigkeit für den Modellzweck“ (ebd. S. 36). Entscheidend für die operationelle Bewährung eines Modells ist demnach lediglich die Strukturtreue hinsichtlich der interessierenden Aspekte.⁷ Diese werden durch die Modellierung aus

⁶ So könnte es z. B. fraglich sein, ob die Auswirkungen einer schwankenden Außentemperatur berücksichtigt werden müssen, oder ob Temperaturunabhängigkeit angenommen werden kann.

einem Kontinuum von Möglichkeiten ausgewählt. Anschaulich verdeutlicht der Informatiker Wolfgang Hinderer (1992) dies an einem Beispiel:

„Das System ‘Kugel auf schiefer Ebene mit nach unten gerichteten Kraftfeld’ ist rein formal: In der materiellen Realität gibt es weder exakte Kugeln noch exakte Ebenen. Wenn nun dies Modell durch eine strukturtreue Zuordnung – mehr schlecht als recht – etwa einem runden Stein an einem Hang zugeordnet wird, dann folgt aus der Strukturtreue, daß der reale Stein den realen Hang hinabrollt. [...]. Der Stein rollt auch unabhängig von möglichen zusätzlichen Eigenschaften, etwa daß es sich um einen Teil einer antiken Statue handelt“ (S. 26)

Analytisch basierte technikwissenschaftliche Modellierung setzt damit vom Prinzip her⁸ die für neuzeitliche Naturwissenschaft charakteristische „*Formierung des wissenschaftlichen Objektes*“⁹ über eine „*schrittweise Rekonstruktion der Welt auf einer praktischen oder technischen Ebene*“¹⁰ in einer noch verschärften Weise fort. Ebenso wie die moderne wissenschaftliche Methode liefert sie exaktes und effektives Wissen, das jedoch für seine Anwendung auf eine künstlich hergerichtete Umgebung angewiesen ist und keinesfalls alle Aspekte des modellierten Bereiches von Welt erfaßt. Sollte es daher eines Tages doch von Interesse sein, ob es sich um den Kopf einer antiken Statue handelt, die da den Hang hinabrollt, kann auf das alte Modell nicht einfach aufgesetzt werden. Ebensowenig kann die auf der Basis des Modells entwickelte Technologie ohne weiteres anders betrieben oder genutzt werden.¹¹ Vielmehr muß, wenn die in Abschnitt 1.4 ausgeführte These von der Umformung der Welt nach dem Bild des Modells zutrifft, davon ausgegangen werden, daß die in den beschriebenen Auswahl-schritten einer analytischen Modellierung getroffenen zweckgebundenen Annahmen im Verlauf der Implementation technischer Systeme „wahrgemacht“ werden. Die Tatsache, daß es sich bei jedem auch noch so differenzierten analytischen Modell um ein von bewußten zweckbestimmten Grenzziehungen und Auswahl-schritten geprägtes Gebilde und nicht um ein vereinfachtes Abbild von Realität handelt, wird in der Modellierungsphase noch ansatzweise reflektiert. Später jedoch hat sich das funktionierende Modell zusammen mit den entsprechenden Versuchsanordnungen und Denkgewohnheiten zu einer stabilen Einheit technikwissenschaftlichen Wissens verfestigt. Diese „Black-Box“ wieder zu öffnen, indem die bewußte Festlegung von Grenzen und die Auswahl von Abbildungsaspekten auch in der Anwendungsphase in Erinnerung gerufen und in ihren gesellschaftlichen Auswirkungen kenntlich gemacht wird, muß das Ziel einer sozialwissenschaftlichen Untersuchung technischer Methoden, wie sie hier vorgenommen wird, sein. Analytische Modellierung muß daher nicht als realitätsabbildende sondern als realitätskonstituierende Praxis untersucht wer-

7 Vgl. hierzu auch die Ausführungen zu dem Modellbegriff von Heinrich Hertz und die Umkehrung der Abbildungsrichtung zwischen Modell und Realität in Abschnitt 1.3.

8 Ob die tatsächliche Praxis ingenieurwissenschaftlicher Modellierung diesem deduktiven Prinzip überhaupt folgt, wird im Verlauf der weiteren Untersuchung durchaus in Frage gestellt werden.

9 Böhme (1992a, S. 29-39).

10 Ebd. S. 39.

11 Besonders offensichtlich ist die Abhängigkeit der Auswahlkriterien von vorgängigen Vorstellungen über die modellierten Strukturen bei den sogenannten „Weltmodellen“, mit denen zum Zwecke der Politikberatung globale Entwicklungen simuliert werden. Auch hier kann gezeigt werden, daß sich diese hochideologischen Modelle selbst „verwirklichen“, wenn sie als Entscheidungsleitfaden für politisches Handeln verwendet werden. So wird z. B. das bestehende Geschlechterverhältnis zementiert, wenn die Kategorie Geschlecht gar nicht erst als Kriterium in die Modellierung aufgenommen wurde. Vgl. hierzu Emenlauer-Blömers u. a. (1990).

den. Wenn im folgenden also für die FEM nach Übersetzungen gesucht wird, die materielle Komponenten in ein gesellschaftliches Dispositiv einweben, so ist ein besonderes Augenmerk auf Grenzziehungen und Akte von Auswahl und Ausschluß von Aspekten der Phänomene zu richten.

Numerische Auflösungen

Zu einer analytisch basierten Computersimulation gehört mehr als nur die Aufstellung der das System beschreibenden Differentialgleichungen mit den zugehörigen Rand- und Anfangsbedingungen. Ein wesentlicher Schritt auf dem Weg zu einer praxisrelevanten Auswertung ist die Lösung dieser Modellgleichungen. Erst eine solche Lösung der Systemgleichungen nämlich beschreibt das Verhalten des Systems in einem konkreten Fall. Die Möglichkeit solche Lösungen zu ermitteln ist keineswegs selbstverständlich. Zahlreiche Modelle der Naturwissenschaften bestehen schon seit langer Zeit und liefern qualitative Erklärungen ohne Aussagen über konkretes Systemverhalten treffen zu können. Dies liegt daran, daß die Differentialgleichungen, die das Modell bilden, analytisch nicht lösbar sind. Das bedeutet, daß zwar prinzipiell bekannt ist, wie die Veränderungen der Systemgrößen über Ort und Zeit miteinander verknüpft sind, daß aber keine Lösungsfunktion und damit kein expliziter Zusammenhang zwischen einem Eingangsgrößenverlauf und dem zugehörigem Systemausgang angegeben werden kann. Dies gilt z. B., wie oben schon erwähnt wurde, für die vollen Navier-Stokes Gleichungen der Strömungsmechanik und für die Wärmeleitgleichung. Es kann aber auch schon bei sehr einfachen Systemen der Fall sein. So zeigt Paul Humphreys (1990, S. 498 ff.), wie schon die Einbeziehung der Abstandsabhängigkeit der Schwerkraft und der geschwindigkeitsabhängigen Luftreibung es unmöglich macht, aus einer einfachen Bewegungsgleichung eine Vorhersage für die Position eines Objektes herzuleiten.¹² Auch bei einfachen, prinzipiell lösbaren Systemgleichungen können für konkrete Objekte häufig keine Lösungen angegeben werden, weil deren komplexe Struktur zu komplizierten Randbedingungen führt. In eben diesen Fällen, in denen keine analytische Lösung der Systemgleichung möglich ist, setzen computergestützte Simulationsverfahren an. Dabei sind es mit den „numerischen Methoden“ mathematische Verfahren, die als Bindeglied zwischen fundamentalen mathematischen Modellen und konkretem Systemverhalten fungieren, und so die Simulation von Systemverhalten auf der Basis theoretischer mathematischer Modelle ermöglichen. Für die Computersimulation technikwissenschaftlicher Probleme ist dabei aus den oben dargestellten Gründen vor allem die Behandlung von Differentialgleichungen von Interesse.¹³ Numerische Methoden ermöglichen es, Differentialgleichungen, für die keine analytische Lösung bekannt ist, durch schrittweise Integration für einen konkreten Fall auszuwerten.¹⁴ Dazu müssen die kontinuierlichen Gleichungen in diskrete Gleichungen (Differenzengleichungen) umgewandelt werden. Eine

12 Vorhersagbarkeit ist somit kein selbstverständlicher Bestandteil einer deterministischen Auffassung von Welt. Humphreys (1995/96, S. 120 ff.) betont daher die wesentliche Rolle, die die Entwicklung mathematischer Methoden bei der Entwicklung von Wissenschaft spielt.

13 Zur numerischen Mathematik gehört nicht nur die numerische Lösung von Differentialgleichungen. Auch andere Probleme wie die Auflösung nichtlinearer Gleichungen mit mehreren Variablen oder die Inversion von Matrizen werden mit numerischen Methoden behandelt.

14 Allerdings kann auch mit der Hilfe numerischer Methoden nicht jedes mathematisch beschriebene System in seinem Verhalten erfaßt werden. Das Verhalten mancher Systeme ist in einem so hohem Maße abhängig von den Anfangsbedingungen, daß deren Angabe die mögliche Genauigkeit von Digitalrechnern übersteigt. Diese Systeme werden auch als chaotisch bezeichnet.

solche Diskretisierung kann für jede unabhängige Variable der Differentialgleichung, also die Zeit und die verschiedenen Raumkoordinaten, durchgeführt werden. Das Raum-Zeitkontinuum, in dem sich eine stetige, kontinuierliche Systemgleichung bewegt, wird dadurch in ein Raster kleiner Elemente zerlegt. Dadurch werden Differentialgleichungen, für die keine analytische Lösung möglich ist, einer zahlenmäßigen „numerischen“ Lösung zugänglich. Zur numerischen Lösung solcher Gleichungssysteme existiert eine Vielzahl verschiedener Algorithmen, die je nach Art der Gleichung mehr oder weniger schnell und genau zu einer Lösung führen. Idealerweise nähert sich die numerische Lösung bei einer genügend feinen Diskretisierung der kontinuierlichen Lösungsfunktion an.

Die beschriebene numerische Auflösung der Modellgleichungen ist der Kernbestandteil einer jeden analytisch basierten Simulation.¹⁵ Numerische Verfahren können wegen des hohen Rechenaufwandes nur bei einer ausreichenden Verfügbarkeit von Rechenkapazität in relevantem Maße eingesetzt werden.¹⁶ Erst der Transfer des mathematischen Modells in den Computer ermöglicht es daher, diese Methoden in großem Umfang anzuwenden. Viele Autoren sind der Auffassung, daß für die Erhöhung der Effektivität von Simulationen und damit für die Kostenreduktion die Verbesserung der numerischen Algorithmen den gleichen Anteil wie die Weiterentwicklung der Computertechnik hat. Alle Verfahren der analytisch basierten Computersimulation stützen sich auf numerische Methoden. Der Weg von der Modellgleichung bis zur numerischen Behandlung ist jedoch sehr lang und für jedes einzelne Verfahren unterschiedlich. Am Beispiel der Methode der Finiten Elemente wird deutlich werden, daß auch diese Transformationsschritte als Bestandteil eines Rekonfigurationsvorgangs soziotechnischer Strukturen beschrieben werden können.

Computerprogrammierung

Die oben beschriebenen Algorithmen werden durch „Programmierung“ auf den Computer übertragen. Erst durch diesen Akt wird erreicht, daß die „universelle Maschine“ Computer die spezifische Aufgabe der Simulation ausführt. Durch die Programmierung werden die in der Sprache der Mathematik formulierten Anweisungen in die von einem Computer verarbeitbare Form gebracht.¹⁷ Die Programmiertechniken haben erheblichen Einfluß auf die Realisierung von Computersimulationen. Nur die sorgfältige Anpassung der entwickelten Algorithmen an die Architektur der Computerplattform, auf der die Berechnung ausgeführt wird, garantiert eine fehlerfreie Umsetzung des Algorithmus.¹⁸ Durch eine unangemessene Programmierung kann es geschehen, daß ein mathematisch korrekter Algorithmus nicht „konvergiert“ und damit kein Ergebnis liefert.¹⁹ Vor allem die Geschwindigkeit, mit der eine numerische Lösung erreicht wird, die in vielen Fällen über die Möglichkeit zur Durchführung eines Pro-

15 Da numerische Verfahren keine allgemeinen sondern immer nur spezifische Lösungen für einzelne Fälle liefern, wird ihre Anwendung auch als „numerisches Experiment“ bezeichnet. Eine Diskussion dieser Bezeichnung findet sich in Abschnitt 3.4.15.

16 Vgl. hierzu auch Abschnitt 2.6.

17 Auf dem Weg von der Programmiersprache bis zu den Anweisungen elektronischer Schaltvorgänge im Computer, die letztlich die Basis jedes Vorgangs dort bilden, sind noch mehrere Übersetzungsebene involviert, die hier nicht im Einzelnen aufgeführt werden können.

18 Trottenberg (1999, S. 6) beschreibt diesen Anpassungsvorgang für parallele Rechnerarchitekturen.

19 Etwa weil nicht bedacht wurde, daß durch die begrenzte Genauigkeit von Zahlenwerten im Computer Rundungsfehler entstehen, die sich in ungünstigen Fällen akkumulieren.

3.3 Vorüberlegungen zur analytischen Modellierung

jektes entscheidet, wird durch die Programmiertechniken wesentlich beeinflußt. Die Computerprogrammierung kann aus diesen Gründen als ein integraler Teil jeder Simulationsanwendung betrachtet werden. Ebenso wie die beteiligte naturwissenschaftliche Fundamentaltheorie trägt sie zu der erfolgreichen Generierung von Wissen mit dem Instrument der Computersimulation bei.

3.4 Die Finite Elemente Methode

In diesem Abschnitt soll die „Finite-Elemente-Methode“ (FEM) vorgestellt und untersucht werden. Die FEM basiert auf analytischer Modellierung und ist eine der am weitesten verbreiteten Methoden der Computersimulation in der Technikentwicklung. War ihre Anwendung zu Beginn ihrer Entwicklung in den 1950er Jahren noch auf Spezialprobleme finanzkräftiger Industriezweige – Vorreiter war hier einmal mehr die Luft- und Raumfahrt sowie die Autoindustrie – beschränkt, so ist sie mittlerweile in nahezu allen Anwendungsbereichen und Fachgebieten der Technikentwicklung zu finden. Dabei hat die FEM, so die einhellige Meinung aller Beteiligten, die Möglichkeiten der Technikentwicklung revolutioniert. Ein Großteil moderner technischer Artefakte wäre ohne die FEM oder verwandte Methoden der Computersimulation²⁰ zweifellos in dieser Weise nicht möglich gewesen.

In dieser Untersuchung ist weder eine detaillierte Beschreibung der Methode der Finiten Elemente mit all ihren Feinheiten noch eine Auflistung all ihrer Anwendungsmöglichkeiten oder eine historisch orientierte Analyse ihrer Verbreitung intendiert.²¹ Vielmehr geht es mir darum, anhand von qualitativen Analysen der Fachliteratur und einigen Anwendungsaufsätzen auszuloten, wie die Finite Elemente Methode als vermittelndes Instrument nicht nur zwischen naturwissenschaftlicher Theorie und konkreter technischer Anwendung, sondern auch zwischen materiellen und anderen Komponenten gesellschaftlicher Strukturen Verbindungen knüpft. Dabei kann an die in dem vorherigen Abschnitt erarbeiteten Ansatzpunkte für die analytische Modellierung angeknüpft werden. Zunächst stellen sich jedoch für die Methode der Finiten Elemente eine Reihe von konkreten Fragen: Welche Art von Wissen ist es, das die FEM produziert und sie zu einem so mächtigen Instrument bei dem Eingriff in die Welt macht? Was kennzeichnet die FEM als spezifische Verarbeitungsweise von Welt? Gibt es qualitative Unterschiede zu traditionellen, nicht computergestützten Weisen technikwissenschaftlicher Wissenserzeugung oder handelt es sich lediglich um eine wirkmächtige Zusammenführung von Wissenstechniken aus den verschiedensten Wissensgebieten? Wie wirkt sich der Einsatz von FEM auf die entwickelten Technologien aus? Sind hier vollkommen neuartige technische Lösungen zu erwarten oder verläuft die Technikentwicklung mit neuen Methoden in alten Bahnen?

Zunächst soll hier die gängige Vorstellung vieler Akteure über die Funktion der FEM bei der Entwicklung und Vermarktung technischer Artefakte vorgestellt werden. Im Anschluß daran wird dann die Vorgehensweise vorgestellt, mit der hier versucht werden soll, den Antworten auf die genannten Fragestellungen näherzukommen.

3.4.1 Schneller, billiger, besser – Neue Welten aus Finiten-Elementen

Die Methode der Finiten Elemente ist aus der Strukturmechanik heraus entwickelt worden. Die wesentliche Aufgabenstellung, die es in diesem zentralen Bereich der Technikwissenschaft zu bearbeiten gilt, ist es zu ermitteln, wie sich Strukturen von Festkörpern – beispielsweise Tragwerke oder Fahrzeugkarosserien – unter verschiedenen Belastungen verhalten. Die Differentialgleichungen, die aus einer physikalisch

20 Ähnlich gelagerte Verfahren mit eigenen Anwendungsschwerpunkten sind vor allem die Boundary-Elemente Methode (BEM) und der Finite Volumen Ansatz. Das Differenzenverfahren zielt auf ähnliche Problemstellungen, geht aber anders an die Differentialgleichungen heran. Für die hier beabsichtigten Fragestellungen kommt es nicht auf diese Unterschiede an. Daher reicht es aus, exemplarisch die FEM zu untersuchen.

21 Einige Aspekte zu der Verbreitungsgeschichte finden sich in Abschnitt 2.1.

mathematischen Analyse solcher Probleme abgeleitet werden können, beschreiben den Zusammenhang zwischen den aufgetragenen Belastungen, den Verformungen der Körper und den Reaktionen innerhalb der Körper (Spannungen). Für einzelne Idealfälle existieren Lösungsansätze dieser Gleichungssysteme. So kann z. B. aus der Differentialgleichung für den sogenannten Euler-Bernoulli Balken (ein einseitig eingespannter Balken) dessen Verhalten bei zeitlich wechselnder Belastung berechnet werden. Dabei handelt es sich zwar um exakte Lösungen. Diese beschreiben aber nur idealisierte Bauteile. Sobald der Balken z. B. eine Kerbe oder einen Absatz aufweist, treten Spannungsspitzen auf, die nicht durch solche Lösungen erfaßt werden können. Für kompliziertere Strukturen als einfache Balken ist eine Lösung der Differentialgleichung über das ganze Bauteil hinweg ohnehin nicht möglich, da die Beschreibung der Geometrie zu sehr komplizierten Randbedingungen führt. Auch Näherungslösungen (z. B. durch Überlagerungen von Polynomen) stoßen hier schnell an ihre Grenzen. Damit steht die Strukturmechanik genau vor der oben beschriebenen Schwierigkeit der Technikwissenschaft, naturwissenschaftliche Grundlagentheorie praxisrelevant auszuwerten. Das übliche Vorgehen in der Technikentwicklung war es lange Zeit, komplizierte Bauteile sehr stark zu vereinfachen, so daß einfache Ansätze angewendet werden können. Für viele Artefakte existiert eine große Anzahl von Erfahrungen, die zusammen mit den vereinfachten Überschlagsrechnungen die Auslegung praxistauglicher Artefakte ermöglicht.²² Eine typische klassische Vorgehensweise ist es, sich in Ermangelung mathematischer Beschreibungen der physikalischen Vorgänge innerhalb der Bauteile bei der Berechnung auf die Absicherung derjenigen Werte zu beschränken, deren Relevanz aus Erfahrung bekannt ist. So ist es z. B. üblich, Wellen nur an kritischen Stellen, wie etwa an dünnen Querschnitten, auf Festigkeit hin zu überprüfen. Die Auswirkung von speziellen Einformungen, wie etwa Kerben, werden dabei über Formfaktoren, die in Versuchen ermittelt wurden, einbezogen. Solche Vorgehensweisen sind im Maschinenbau fester Bestandteil der klassischen Konstruktionslehre. Sie sind in den einschlägigen Regelwerken (DIN Normen, AD Merkblätter etc.) niedergelegt und sind häufig auch die Grundlage für technische Sicherheitsstandards (z. B. TÜV Zulassungen von Behältern auf der Grundlage der Druckprobe). Die bestehende Unsicherheit darüber, was sich tatsächlich im „Inneren“ der Bauteile abspielt, soll durch Sicherheitsfaktoren ausgeglichen werden, was einerseits zu Überdimensionierungen, andererseits aber auch zu ungeahnten Sicherheitsrisiken führen kann. Um genauere Aussagen oder solche über das Verhalten komplexer Geometrien zu erhalten, sind teure und vor allem langwierige Versuche notwendig, wodurch die Entwicklungszeit neuer Produkte verlängert wird. Jede neue Variante erfordert wieder neue Versuche und dazu die teure und zeitaufwendige Fertigung von Prototypen. Dies gilt umso mehr, je weniger Erfahrung mit der betreffenden Techno-

22 Der Begriff der „Erfahrung“ wird hier und im folgenden in einer pragmatischen Weise gebraucht, wie es auch in den Ingenieurwissenschaften üblich ist. Er bezeichnet Wissensbestände, die sich über eine lange Zeit und durch eine Vielzahl von Anwendungen gebildet haben. Zwar wird es häufig der Fall sein, daß gerade solche Wissensbestände stark personengebunden sind oder eher auf experimentellen Vorgehen als auf mathematischer Analyse beruhen, dies ist aber nicht zwingend. Auch ein ingenieurwissenschaftliches Tabellenwerk kann Erfahrung repräsentieren, während die Ergebnisse modernster experimenteller Einrichtungen jenseits jeder so verstandenen Erfahrung liegen können. In diesem Sinne schreibt etwa Fröhlich (1995, S. 96): „Üblicherweise wird nach Erfahrungswerten so konstruiert, daß ein Bauteil seine Funktion sicher erfüllt. Sobald man sich den Haltbarkeitsgrenzen nähert, wird die Sache schwierig. Zur Konstruktion immer besser ausgenutzter Teile werden Versuche und zunehmend die FE Methode eingesetzt.“

logie schon vorliegt und je komplexer das zu entwickelnde Artefakt ist – beides Voraussetzungen, die besonders für neuartige Spitzentechnologie in hohem Maße zutreffen.²³

Diese schwierige Situation wird in nahezu allen Veröffentlichungen zu der Methode der Finiten Elemente als Auslöser für deren rasche Verbreitung in allen Industriezweigen beschrieben. Da der Markt eine immer schnellere Einführung neuer Produkte erzwingen könne – so die vielfach vertretene Meinung – mit den althergebrachten Verfahren der Technikentwicklung nicht mehr konkurrenzfähig gearbeitet werden. Die FEM ermögliche dagegen auch für „reale“ Strukturen eine gezielte Auswertung von Differentialgleichungen und könne damit in kürzerer Zeit als das klassische Experiment detailliertere Erkenntnisse liefern. Sowohl die untersuchten Fachbücher als auch sämtliche Einzelaufsätze nennen in der ein oder anderen Form die Fähigkeit „schneller“ und „billiger“ „bessere“ und „mehr“ Informationen zu liefern, als den wesentlichen Vorteil der FEM-Simulation gegenüber dem klassischen rein versuchsgestützten Entwicklungszyklus.²⁴

Im folgenden sollen die am häufigsten genannten Möglichkeiten, die FEM bei der Entwicklung und Fertigung technischer Artefakte vorteilhaft einzusetzen, aufgeführt werden. Zur Verdeutlichung werden dabei beispielhafte Anwendungen in stark verkürzter Darstellung angeführt.

- Optimierung der Form oder Struktur von Artefakten zur Verbesserung ihrer Eigenschaften. Diese kann entweder schon in der Entwicklungsphase oder nachträglich für schon gebaute Artefakte stattfinden.

Beispiel für die nachträgliche Optimierung (Drtina/Krause 1996): Bei Kraftwerken an sandigen Gewässern trat immer wieder das Problem auf, daß die Turbinen durch die starke Reibung vorzeitig verschlissen (Sandabration). Eine FEM-Simulation der Strömung mit den Sandpartikeln zeigte, wie der Sand an bestimmten Stellen gegen die Turbinenwand gespült wird. Auf der Basis dieser Ergebnisse kann die Turbine in Zukunft an den kritischen Stellen mit einer Schutzschicht versehen werden. Außerdem können zukünftige Turbinen von vornherein „abrasionsarm“ ausgelegt werden.

Beispiel für Optimierung in der Auslegungsphase (Georges u. a. 1998, S. 907): Das Einfedern einer Fahrzeugtragfeder wird mit der FEM simuliert. Dabei stellt sich heraus, daß sich bei der ursprünglich geplanten Konstruktionsform die Federwindungen beim Einfedern berühren, was zur Zerstörung der Schutzschicht und damit zu einem vorzeitigen Versagen führt. Daraufhin wird die Konstruktion so modifiziert, daß in der Simulation kein Federwindungskontakt mehr auftritt.

- Optimierung von Fertigungs-Prozessen.

Beispiel (Kaufmann/Smarr 1994, S. 167): Das Gießen von flüssigem Metall in Formen wird mit der FEM modelliert. Aus den Simulationsergebnissen werden Schlüsse darüber gezogen, wie Gußfehler vermieden werden können.

- Ermittlung der Ursachen für das Versagen eines Artefaktes.

23 So weist z. B. Zhai (1996, S. 1) darauf hin, daß die durchschnittliche Windkanalbelegungszeit für die Entwicklung eines Flugzeugs exponentiell gestiegen ist und nun für ein modernes Flugzeug fast 10 Jahre beträgt.

24 So schreibt etwa Schweizerhof (1999, S. 24): „Zugleich verspricht sie [die Industrie P.W.] sich von den reichen Experimentiermöglichkeiten besser (in bezug auf Gewicht, Belastbarkeit, Versagenssicherheit und Preis) und in kürzerer Zeit optimierte Produkte.“ Ähnlich in Kaufmann/Smarr (1994, S. 164): „Im engen Wechselspiel zwischen Mensch und Computer können auf diese Weise Festigkeit, Sicherheit und Haltbarkeit von Bestandteilen optimiert werden, während gleichzeitig Kosten-, Zeit- und Materialaufwand der Entwicklung verringert werden.“

3.4 Die Finite Elemente Methode

Beispiel (Achenbach 1997): Eine Kolbendichtung aus Kunststoff versagt häufig früher als erwartet. Eine FEM-Simulation zeigt, daß bei der vorliegenden Betriebstemperatur chemische Abbauvorgänge innerhalb des Dichtungsringes einsetzen, die zu einem vorzeitigen Abfall der mechanischen Eigenschaften führen. Daraufhin kann ein anderer Kunststoff gewählt werden, der die Anforderungen besser erfüllt.

- Nachweis bestimmter Eigenschaften gegenüber Kunden.

Ein solcher Nachweis über die Funktions- oder Betriebssicherheit von technischen Artefakten wird immer häufiger auf der Basis einer FE-Analyse statt mit klassischen Berechnungsverfahren gefordert (vgl. Fröhlich 1995, S. 131).

- Entwicklung von Steuerungen.

Beispiel (Felbausch/Friedmann 1998): Ein Abgasventil wird über einen Elektromagneten gesteuert. Dazu muß der Zusammenhang zwischen Stromzufuhr und Ventilöffnung exakt bekannt sein. Mit der FEM wird die Ausbreitung des Magnetfelds in dem Ventil simuliert. Daraus kann die für die Regelung benötigte Kraftcharakteristik ermittelt werden. Gleichzeitig wurde hier auch die Geometrie des Magnetankers so optimiert, daß die Regelung besonders effektiv ist.

Als Motivationen dafür, gerade in bestimmten Fällen neue Wege zu suchen und die FEM in der Entwicklung einzusetzen, werden genannt:

- Gestiegene Anforderungen an das Produkt, denen auf herkömmliche Weise nicht mehr beizukommen ist.

Beispiel (Kleeberger 1996): Da auf Großbaustellen immer mehr vormontierte Komponenten eingesetzt werden, müssen die zum Heben eingesetzten Gittermastkrane immer größere Lasten bewältigen und immer höhere Ausleger aufweisen. Mit diesen neuen Dimensionen sind klassische Auslegungsverfahren überfordert (S. 2). Kleeberger setzt daher die FEM zur Auslegungsberechnung von Gittermast-Fahrzeugkranen ein.

- Neue kompliziertere Technologien können mit herkömmlichen Verfahren nicht behandelt werden

Beispiel (Georges u. a. 1998, S. S. 904): Bei der oben erwähnten Fahrzeugtragfeder konnten die früher üblichen analytischen Verfahren zur Federberechnung nicht angewendet werden, weil dies für die „heutigen komplizierten Federgeometrien nicht praktikabel“ ist. Versuche an realen Bauteilen verbieten sich aus Zeitgründen.

- Für eine Technologie ist eine Optimierung auf sehr spezielle Zwecke statt einer breiten Einsatzpalette gefordert.

Beispiel (Zhai 1996): Für Kampfflugzeuge sind Messungen im Windkanal bei extremen Bedingungen notwendig. Dafür reichen das klassische Meßinstrumentarium und die Verfahren zu dessen Entwicklung nicht aus. Zhai entwickelt mit der Hilfe von FEM eine optimierte Meßeinrichtung (Windkanalwaage) die speziell für die Extrembedingungen von Versuchen mit Kampfflugzeugen geeignet ist, ansonsten aber Nachteile aufweist (siehe auch Abschnitt 3.4.9).

- Mit der betreffenden Technik liegt noch kaum Erfahrung vor.

Beispiel (Pfitzinger 1998): Für Axialverdichter werden vollkommen neue Schaufelprofile entwickelt, um immer höhere Durchlaufgeschwindigkeiten zu ermöglichen. Die in jahrzehntelanger Arbeit zusammengetragenen Meßwerte zu unterschiedlichen Schaufelformen können dafür nicht herangezogen werden. Versuche mit FEM sind für Pfitzinger daher die einzige Möglichkeit, neuartige Schaufelprofile zu untersuchen (siehe auch Abschnitt 3.4.9).

- Messungen sind sehr aufwendig und schwierig.

Beispiel (Ulrich 1999): Für die von Ulrich untersuchten Mikropumpen treffen fast alle genannten Motivationen für den Einsatz von FEM zu. Es handelt sich um eine vollkommen neue Technologie mit speziellen Anforderungen an die Bauteile, in der noch kaum Erfahrungen vorliegen und klassische

3.4 Die Finite Elemente Methode

Auslegungsverfahren (z. B. für konventionelle Pumpen und Ventile) wegen der speziellen Verhältnisse nicht angewendet werden können. Zusätzlich ist jedoch die Durchführung von Versuchen wegen der geringen Abmessungen extrem schwierig, so daß FEM-Simulationen für Ulrich der einzig gangbare Weg zur Wissensgewinnung über die Vorgänge in solchen Systemen ist (S. 5).

Fröhlich (1995, S. 129) weist außerdem darauf hin, daß auch die verstärkte Werbung der FEM-Anbieter und die größere Anzahl von Ingenieuren, die schon im Studium FE-Methoden kennengelernt haben, maßgeblich zu deren schneller Verbreitung beigetragen haben. Vor allem jedoch verbinden sich mit den genannten Vorteilen des Einsatzes von FEM Erwartungen an höhere Gewinne. Als die wesentlichen Faktoren werden dabei genannt:

- Erlangung eines Marktvorsprunges bei der Einführung eines Produktes aufgrund der Zeitersparnis, die durch die Verringerung der notwendigen Zahl an Laborversuchen erreicht wird.
- Kostenreduzierung durch die Einsparung von Versuchen mit teuren Prototypen.²⁵
- Kostenreduzierung durch Einsparung an Werkstoff durch die optimierten Bauteilformen. Dies gilt vor allem für Bauteile in der Massenproduktion.
- Kostenreduzierung in der Fertigung (z. B. geringerer Werkzeugverschleiß, niedrigerer Energieverbrauch etc.).
- Kostenersparnis durch Risikominderung. Die frühzeitige Simulation der Eigenschaften des Produktes hilft teure Fehlkonstruktionen zu vermeiden (vgl. Fröhlich 1995, S. 158)

Alle geschilderten Funktionen der FEM illustrieren die ihr zugeschriebene Mächtigkeit als Instrument zur Beherrschung von Märkten und Materie. Entsprechend fragt es sich nun, wie die beschriebene Wirkmächtigkeit der FEM-Ergebnisse zustande kommt. Diese Frage muß sowohl in methodischer als auch in praktischer Hinsicht gestellt werden. Denn nicht nur Gleichungen und Formeln sondern auch konkrete Abläufe in Betrieben werden im Zuge der neuen Verfahrensweisen umgestellt, um den erfolgreichen Einsatz von Computersimulationen abzusichern. Zunächst soll es um die eher formalen Mechanismen der Produktion finiter Wirklichkeit gehen. Dazu wird im folgenden kurz das Prinzip der FEM erläutert. Dabei soll deutlich werden, auf welche Weise das klassische Dilemma der auf die komplexe Wirklichkeit nicht anwendbaren Grundlagentheorie mit FEM umgeformt und bearbeitet wird. Anschließend werden die einzelnen Schritte der FEM-Modellierung aufgeführt, um zu zeigen, wie durch vielfältige Übersetzungen heterogener Elemente die Instrumentfunktion der FEM-Modelle geformt wird. Dann werden andere „harte und weiche“ Komponenten finiter Konstruktionen benannt und analysiert. Am Ende dieser Untersuchungen soll in Abschnitt 3.4.9 versucht werden, die Methode der Finiten Elemente epistemologisch einzuordnen und damit die Frage zu beantworten, ob mit der FEM und ähnlich gelagerten Simulationsmethoden tatsächlich eine vollkommen neue Qualität von Wissen über Welt erzeugt werden kann.

²⁵ Dieser Punkt steht aber interessanterweise gegenüber der Zeitersparnis an zweiter Stelle. So schreibt etwa Fröhlich (1995, S. 159): „Das Kostenargument wird heute jedoch fast vollständig durch den Zwang zur immer schnelleren Entwicklung eines Produktes verdrängt.“.

3.4.2 Das Grundprinzip finiter Modellierung

²⁶Ausgangspunkt für die FEM-Berechnungen sind die auf naturwissenschaftlichen Ansätzen beruhenden Differentialgleichungen, welche die Zusammenhänge zwischen den Größen, die untersucht werden sollen, beschreiben. Dies können – je nach Untersuchungsinteresse – die oben genannten Gleichungen der Strukturmechanik aber auch die Grundgleichungen der Wärmeübertragung oder die Bilanzen von Energie, Masse und Impuls in Strömungen sein. Behandelt wird dabei stets ein abgegrenztes Gebiet materieller Strukturen. Dabei kann es sich um einzelne Festkörper, wie etwa ein Maschinenteil aber auch um Ausschnitte aus kontinuierlichen Medien, wie ein Strömungsabschnitt oder ein Wärmefeld innerhalb einer Wand handeln. Statt jedoch eine analytische Lösung der Gleichungen in Gestalt einer Funktion, die das Verhalten der in diesem Gebiet interessierenden Größen beschreibt, zu suchen, wie es auf klassischem mathematischen Wege nötig wäre, wird das Problem in der FEM zunächst „diskretisiert“. Die Gebiete, die mit Hilfe der FEM untersucht werden sollen, werden dabei in sehr viele kleine Bereiche – die „Finiten Elemente“ – unterteilt. Die einzelnen Elemente sind über die sogenannten Knoten miteinander gekoppelt und bilden zusammen ein „Gitter“ oder „Netz“, mit dem das zu modellierende System überzogen ist.²⁷ Für jedes einzelne Element werden nun Näherungsansätze zur Lösung der Differentialgleichungen gemacht.²⁸ Die Randbedingungen sind dabei durch die jeweiligen Nachbarelemente vorgegeben. Statt kontinuierlicher Verläufe der gesuchten Größen werden jetzt nur noch die Werte an den Knotenpunkten gesucht. Die Aufstellung der Gleichungen für alle Elemente führt zu sehr großen Gleichungssystemen.²⁹

Diese Gleichungssysteme stellen das FEM-Modell des betreffenden Weltausschnittes dar. Mit Hilfe des Computers können sie über geeignete Algorithmen für bestimmte Fälle, die durch Angabe der Rand- und Anfangsbedingungen beschrieben werden, gelöst werden.³⁰ Dieses Lösen der Systemgleichungen unter verschiedenen Bedingungen bildet den eigentlichen Kern einer analytisch basierten Computersimulation und wird häufig als numerisches Experiment bezeichnet. Am Ende eines solchen

26 In diesem Rahmen kann (und soll) nur ein sehr grober Abriß der wesentlichen Prinzipien der FEM geleistet werden. Für detailliertere Informationen muß auf die Fachliteratur verwiesen werden.

Einen guten, auch für Laien verständlichen Einstieg bietet das Dossier „Software“ von Spektrum der Wissenschaft (Dossier 2/99). Eine etwas ausführlichere, sehr gut verständliche Einführung mit anschaulichen Beispielen geben Kaufmann/Smarr (1994, S. 82 ff). Eine gut lesbare Darstellung vor allem der Probleme des praktischen Einsatzes von FEM in der Industrie gibt Fröhlich (1995). Ein weitverbreitetes, praxisorientiertes Lehrbuch ist Müller/Groth (1999). Für Darstellungen der Theorie der FEM, vgl. dort die Literaturangaben zu Teil II.

27 Gittermethoden wurden in den Ingenieurwissenschaften, speziell in der Struktur-Mechanik schon früh eingesetzt, um an komplizierten Tragwerken Verschiebungen und Kräfte zu berechnen. Dabei wurden die riesigen Gleichungssysteme in Form von Matrizen abgelegt. Erst Ende der 60er Jahre wurden ähnliche Ansätze aus der Mathematik in das Vorgehen einbezogen. Vgl. hierzu Rannacher/Stein (1996) und Klein (1997).

28 Dazu muß die Differentialgleichung zunächst in ein algebraisches Gleichungssystem überführt werden. Dies kann entweder über das Variationsprinzip oder über sogenannte Galerkin Methoden (d.h. Minimierung eines Gütefunktional) geschehen. Die Näherung tritt in dem Moment ein, in dem für die gesuchten Größen (z. B. bei dem Balken die Verschiebung) Ansatzfunktionen eingeführt werden.

29 Müller/Groth (1999, S. 48) geben als üblich Größe für ein FEM-Berechnungsmodell 10.000 bis 30.000 Elemente an. Modelle mit bis zu 1 Mio kommen ihnen zufolge bisher vor. Trottenberg (1999, S. 8) berichtet von einem Modell mit 30 Mio. Unbekannten für die Berechnung der reibungsbehafteten Luftströmung um ein dreidimensionales Flugzeug.

30 Für lineare Probleme kann direkt nach den Unbekannten aufgelöst werden. Bei nichtlinearen Anwendungen und auch bei sehr großen Gleichungssystemen werden iterative Lösungsverfahren angewandt.

„Simulationslaufes“ liegen an jedem Knotenpunkt des Gitters Werte für die gesuchten Größen (z. B. die Verformung) vor. Durch Verfeinerung des Gitters kann die Genauigkeit der Lösung, z. B. an besonders kritischen Stellen, erhöht werden.

Bei den Ergebnissen der FEM handelt es sich in mehrerer Hinsicht um Näherungslösungen. Die Ansatzfunktionen stellen grundsätzlich nur Näherungen der kontinuierlichen Verläufe dar. Verschiedene Ansatzfunktionen und damit andersartige Elementformen liefern unterschiedlich gute Ergebnisse. Die Anzahl und die Größe der Elemente, also die Feinheit des Gitters, beeinflussen die Qualität der Lösung entscheidend. Ein weiterer notwendiger Fehler entsteht bei der numerischen Lösung der Gleichungssysteme. Dies gilt besonders dann, wenn wegen auftretender Nichtlinearitäten oder sehr großer Matrizen iterative statt direkte Lösungsverfahren eingesetzt werden müssen. Die Größe und Art solcher Abweichungen, die durch den Näherungscharakter des Verfahrens entstehen, können bei einer sorgfältigen Analyse eingeschätzt werden. Die genannten „Fehler“ kennzeichnen allerdings nicht die Abweichung gegenüber der „Realität“, sondern diejenige von der mathematisch exakten Lösung des analytischen Modells, das seinerseits aus den unten ausgeführten Übersetzungsleistungen hervorgegangen ist. Zur Validierung müssen die Ergebnisse von FEM-Berechnungen daher mit Werten aus „realen“ Experimenten verglichen werden. Dieser Vergleich zwischen numerischem und realem Experiment kann als Abgleich zweier verschiedenartiger Repräsentationen eines Wirklichkeitsausschnittes aufgefaßt werden.³¹

Nach wie vor ist der größte Einsatzbereich der Finite Elemente Methode die Analyse mechanischer Probleme. Das Verfahren hat sich jedoch schon früh auf viele andere Bereiche technikkwissenschaftlicher Anwendungen ausgebreitet. Die wichtigsten davon sind Wärmeübertragung (Ausbreitung von Wärme in Körpern), Strömungsmechanik (Umströmung und Durchströmung von Körpern), Elektromagnetismus (Bestimmung der Ausprägung von Magnetfeldern), Akustik (Schallausbreitung). Üblich sind außerdem Kopplungen der genannten Bereiche. Vor allem mechanische und thermische Analysen werden oft kombiniert, z. B. wenn durch Wärmedehnung verursachte Spannungen berechnet werden sollen.

3.4.3 Idealisierung – Erste finite Transformationen

In den vorangegangenen Ausführungen wurde dargestellt, daß es mit dem „Trick“ der Diskretisierung gelingt, ein System kontinuierlicher Differentialgleichungen mit den komplizierten Randbedingungen, die entstehen, wenn diese auf ein konkretes System angewendet werden, zu einem algebraischen Gleichungssystem umzuformen, das der Bearbeitung durch computergestützte Algorithmen zugänglich ist. Damit ist jedoch nur das abstrakte mathematische Vorgehen bei der Anwendung der Finiten-Elemente-Methode umrissen. In der Praxis ist eine FEM-Modellierung ein Vorgang, in dessen Verlauf eine Fülle heterogener Elemente in eine Form überführt werden, die eine Computersimulation und alle darauf aufbauenden Aktivitäten ermöglicht. Dieser Weg der bei einer analytisch basierten Computersimulation von der ersten Betrachtung eines kontinuierlich in seinen Kontext eingebundenen Weltausschnittes bis zu einem mit digitalen Operationen manipulierbaren Computermode, das diesen Wirklichkeitsausschnitt in einer Simulation repräsentiert, führt, wurde oben als eine Kette von

³¹ Zum Vergleich numerisches/klassisches Experiment vgl. Abschnitt 3.4.15.

Grenzziehungen, Ausschließungen und Übersetzungen interpretiert, die sich für jedes Modellierungsverfahren von Welt anders zusammensetzt. Hier soll nun versucht werden, diesen Transformationsvorgang – von der zweckgerichteten Dekontextualisierung über verschiedene Übersetzungsstufen bis hin zu dem für das „numerische Experiment“ tauglichen Modell – für die FEM-Modellierung nachzuzeichnen. Dabei ist es nicht möglich, jeden einzelnen der vielen bei einer FEM-Modellierung involvierten Übersetzungsschritte in gleicher Tiefe zu behandeln. Es soll jedoch versucht werden, zumindest einige wesentliche finite Übersetzungsschritte zu analysieren.

Die ersten Schritte bei der Entwicklung eines FEM-Modells werden in der Fachliteratur häufig unter dem Begriff der „Idealisierung“ geführt. Dieser Arbeitsschritt umfaßt laut Müller/Groth (1999):

„das ingenieurmäßige Durchdenken der Aufgabenstellung und die Umsetzung der technischen Aufgabenstellung in ein numerisches Modell“ (S. 182)

Im Einzelnen werden hier die Festlegung der Systemgrenzen, die Erfassung der Umgebungseinwirkung, die Auswahl der zu modellierenden Phänomene, die Vereinfachung der Geometrie, die Einarbeitung des Materialverhaltens, die Wahl der Elementtypen und die Netzgenerierung beschrieben.

Abgrenzung des zu modellierenden Ausschnittes

Die räumliche Abgrenzung des untersuchten Systems von der Umgebung ist einer der ersten Schritte jeder FEM-Modellierung. Nur der Bereich, der innerhalb der hier festgelegten Grenzen liegt, wird im weiteren Verlauf der Modellierung betrachtet. Deutlich wird dieser Akt der Abgrenzung eines Ausschnittes aus einem umgebenden Kontext bei der Behandlung von Ereignissen in kontinuierlichen Medien, wie z. B. Strömungen in Flüssigkeiten oder Wärme in Festkörpern. Da der Wirkungsbereich der betrachteten Phänomene hier in der Regel unbekannt ist, ist es eindeutig, daß Grenzen explizit gezogen werden müssen.

Aber auch wenn etwa einzelne Bauteile einer Maschine untersucht werden sollen, sind die Grenzen der Modellierung nicht automatisch in den Grenzen dieses Bauteils vorgegeben. Benachbarte Bauteile oder auch angrenzende Medien (z. B. ein Magnetfeld) können mitmodelliert oder als konstante Einwirkungen in die Umgebung ausgelagert werden.

Beispiel (Fröhlich 1995, S. 29): Ein PKW-Motorlager soll mit der FEM berechnet werden, um möglicherweise die Konstruktion und damit die Fertigung zu vereinfachen. Das Bauteil hat zwar feste Grenzen, wird aber in dem PKW Gehäuse an einer dünnwandigen Blechstruktur festgeschraubt. Es muß nun überlegt werden, ob diese mitmodelliert werden soll. Anhand von Kontrollrechnungen wird entschieden, daß der Einfluß der Befestigung vernachlässigt werden kann. Die Grenze muß nicht weiter nach außen verlagert werden.

Es ist offensichtlich, daß die Entscheidung über die Systemgrenzen wesentlich von dem praktischen Zweck der Modellierung geprägt ist. Um Rechen- und Modellierungszeit zu sparen, wird man immer bestrebt sein, die Grenzen so eng wie möglich zu ziehen. Andererseits können zu enge Begrenzungen den Modellierungszweck zunichte machen. Schon von diesem ersten Schritt an ist das FEM-Modell somit von seiner Funktion als Instrument zur Gewinnung technologisch verwertbaren Wissens und damit zum Eingriff in die Welt geprägt. Die Grenzziehung ist ein erster vermittelnder Akt zwischen Technologie, Theorie und den Phänomenen.³²

Definition der Umgebungseinwirkung

Mit der Grenzziehung wurde ein kontinuierlicher Ausschnitt von Wirklichkeit in ein System und eine Umgebung unterteilt. Als Folge dieser analytischen Trennung muß nun explizit festgelegt werden, wie die Umgebung auf das System einwirken kann. So müssen z. B. für Kräfte Angriffspunkte oder für Wärme Einleitungsstellen bestimmt werden. Da eine Einbeziehung von Außenwirkungen in ein FEM-Modell nur an Knotenpunkten möglich ist, steht dieser Schritt in Wechselwirkung mit der Vernetzung (s.u.). Da reale Belastungen immer kontinuierlich über einen Bereich stattfinden und niemals nur an einem einzelnen Punkt angreifen, müssen geeignete Verfahren gefunden werden, sie auf finite Weise auszudrücken. Dazu kann es z. B. nötig sein, Flächenlasten in Punktlasten umzudefinieren. Äußere Randbedingungen müssen in Zwangsbedingungen für die finiten Elemente übersetzt werden.

Beispiel (Fröhlich 1995, S. 32): Das oben besprochene Motorlager ist über zwei Bolzen mit dem Gehäuse verbunden. Diese leiten alle auftretenden Kräfte gleichmäßig in die Bohrungen der Halterung über. Im Modell wird dies nachgeahmt, indem für alle betroffenen Knoten sämtliche Bewegungsrichtungen gesperrt werden.

Fröhlich warnt ausdrücklich vor den „Fehlermöglichkeiten“ bei der Modellierung der Umgebungseinwirkungen:

„Die richtige Umsetzung der realen Last- und Lagerungsbedingungen in das FE-Modell hat entscheidende Auswirkungen auf das Analyseergebnis. Eine unzureichende Modellierung dieser Randbedingungen kann zu völlig falschen Verformungs- und Spannungswerten führen.“ (1995, S. 34)

Auswahl der einzubeziehenden Phänomene

Wie bei jeder analytischen Modellierung muß auch bei der Anwendung der FEM explizit entschieden werden, welche Aspekte und Phänomene innerhalb des interessierenden Systems überhaupt modelliert werden sollen. Zudem muß bestimmt werden, welche Wirkungszusammenhänge in das Modell einbezogen werden müssen, damit dieses die ausgewählten Aspekte auch repräsentieren kann. So muß etwa bei der Modellierung der an einer Maschine auftretenden Spannungen überlegt werden, ob zusätzlich zu der mechanischen eine thermische Berechnung durchgeführt werden muß, um auch Spannungen zu erfassen, die durch Wärmedehnung auftreten.

Entscheidungen wie die geschilderten, können nur auf der Basis von Wissen über die wirkenden Zusammenhänge getroffen werden. Solches Wissen kann nicht aus einer alleinigen Anwendung naturwissenschaftlicher Gleichungen abgeleitet werden, da diese von sich aus keinen Hinweis darauf liefern, für welche Bereiche welche Theoriebestandteile anzuwenden sind. Entsprechend wird in der Fachliteratur immer wieder betont, daß gerade dieser Auswahlsschritt ein hohes Maß an Erfahrung in dem entsprechenden Fachgebiet voraussetzt. Wird zur FEM-Modellierung ein fertiges Software Paket eingesetzt, so ist es von dessen Flexibilität abhängig, welche Kombinationen von Wirkungszusammenhängen berücksichtigt werden können.³³

³² Vgl. Morrison (1998, S. 70).

³³ So stellt z. B. nicht jedes System die geeigneten Elemente zur Verfügung, um gleichzeitig Wärmeübertragungen und Spannungen zu modellieren.

Geometrievereinfachung

Bevor die Diskretisierung beginnen kann, muß die zu untersuchende Struktur vereinfacht werden. Solche Geometrievereinfachungen sind unerläßlich, da die exakte Umsetzung realer Geometrien in ein FEM-Modell eine sehr große Zahl von Elementen erfordern würde. Dabei entstünden Gleichungssysteme, die selbst mit modernen Rechenkapazitäten gar nicht oder nur sehr langsam behandelt werden könnten.

Beispiel: In Zhai (1996) wird eine sogenannte Windkanalwaage mit FEM modelliert und untersucht.³⁴ Zur Umsetzung der Struktur in das FEM-Modell schreibt Zhai (S. 11): „In der Waage gibt es viele kleine Bohrungen zur Führung der Kabel. [...]. Eine genaue Modellierung solcher Merkmale würde die Kapazität des Rechners überschreiten, deshalb werden nur die wichtigsten Radien und Bohrungen der Waage modelliert. Die Auswahl erfolgt aus Erfahrungen und durch das Ausprobieren verschiedener Konfigurationen.“

Zwar haben viele Einzelheiten einer Konstruktion keinen Einfluß auf die für den Untersuchungszweck entscheidenden Vorgänge, so daß ihre Modellierung nicht notwendig ist, ob dies jedoch tatsächlich der Fall ist, kann nicht ohne weiteres vorab angegeben werden. So ist es z. B. keineswegs gesagt, daß eine Bohrung alleine deswegen nicht mitmodelliert werden muß, weil sie sehr klein ist. Es kann durchaus sein, daß gerade diese Bohrung Spannungsüberhöhungen verursacht, die für die Sicherheit des Bauteils relevant sind. Die Übersetzung der realen Strukturen in ein einfacheres, der FEM-Analyse zugängliches Gebilde erfordert daher einiges an Überlegung. Dazu das Fachbuch „FEM für Praktiker“:

„Sie müssen ein entsprechendes Verständnis über das von Ihrer Struktur erwartete Verhalten besitzen, um kompetente Entscheidungen darüber treffen zu können, wieviele Details in ihrem Modell berücksichtigt werden müssen“ (Müller/Groth 1999, S. 273)

Auch hier wird also auf ein Vorverständnis der zu untersuchenden Vorgänge gebaut. Zusätzlich muß aber auch das Wissen um die Eigenheiten der Methode schon in diesem Schritt eingebracht werden. Dazu Peter Fröhlich (1995):

„Eine sinnvolle Vereinfachung der Geometrie bedingt das Wissen um die Umsetzung in ein FE-Modell mit den entsprechend geeigneten Finite Elementtypen“ (S. 30)

Die Vereinfachung muß ebenso wie die Auswahl der relevanten Aspekte vor Beginn der Modellierung und ohne Rechnerunterstützung stattfinden. Ebenso wie diese ist sie von dem Zweck der Modellierung bestimmt und verleiht damit der Instrumentfunktion des Modells weiter Kontur.

Auswahl des Elementtyps

Der letzte Schritt der Idealisierung ist die Auswahl des Typs von Elementen, aus denen sich das FE-Modell zusammensetzen soll. Dieser Schritt verknüpft vielleicht am stärksten spezifisches Wissen über die FEM mit einem Vorverständnis für die in dem behandelten Weltausschnitt wirkenden Zusammenhänge. Es handelt sich nämlich bei den verschiedenen Elementtypen nicht um verschiedene mathematische Ansätze zur Lösung ein und desselben Problems. Wesentlich ist es vielmehr, daß ein bestimmter Typ von Element auch nur bestimmte Arten von Wirkungszusammenhängen darstellen kann. Für strukturmechanische Berechnungen ist es beispielsweise entscheidend, welche Art von Belastung modelliert werden kann. Dies ist jedoch vom

³⁴ Diese Anwendung wird weiter unten ausführlich diskutiert.

Elementtyp abhängig. So kann das sogenannte Stabelement nur Längskräfte aufnehmen, während ein Balkenelement auch Querkkräfte und Biegemomente übertragen kann. Volumenelemente können zwar jede Art von Kraftübertragung darstellen. Ihre Verwendung führt jedoch zu sehr großen Gleichungssystemen und ist somit möglichst zu vermeiden. Daher werden in einem einzigen Modell oft verschiedene Elementtypen eingesetzt. Von großer Wichtigkeit ist hier die zweckmäßige Kopplung dieser Elementtypen, da Inkonsistenzen in den Übergängen zu falschen Ergebnissen führen. Analoge Überlegungen gelten für die Elementtypen anderer Einsatzbereiche. Es ist offensichtlich, daß die ModelliererIn eine Vorstellung davon haben muß, welche Art von Wirkungsübertragung zu erwarten ist, um den Elementtyp sinnvoll auswählen zu können. Gleichzeitig muß jedoch Wissen über die mathematische Umsetzung der Elementtypen vorhanden sein, da hieraus die Auswirkungen der Auswahl auf die Lösung des Gleichungssystems folgt. In manchen Anwendungen der FEM kann es nötig werden, spezielle Elementtypen zu entwickeln, da sich die auftretenden Einwirkungen mit den Standardelementen nicht modellieren lassen. So entwirft etwa Kleeberger (1996, S. 55 ff.) für seine Modellierung eines Krans eigens einen Typ finiter Elemente zur Modellierung von Seilen, da kein kommerzielles Programm geeignete Elemente anbietet.

Weitere wichtige Modellierungsentscheidungen, die hier nicht näher erläutert werden können, betreffen die Linearität³⁵ und die Zeitabhängigkeit des zu modellierenden Systemverhaltens. Die Entscheidung darüber, ob Linearität angenommen werden kann, ist für die Modellierung sehr wichtig und keineswegs trivial. Sie erfordert ebenso wie die Auswahl der zu modellierenden Wirkungsprinzipien sowohl ein Verständnis der zu untersuchenden Phänomene als auch für die Eigenheiten der FEM-Algorithmen. Ähnliches wie für die Nichtlinearität gilt für die Zeitabhängigkeit. Ob statische Berechnungen reichen oder relevante Zeitabhängigkeiten bestehen, so daß dynamische Berechnungen durchgeführt werden müssen, ist eine folgenreiche und schwierige Entscheidung.

Modellparameter – Kennwerte der Realität

Bis zu diesem Punkt besteht das FEM-Modell aus einer Auswahl von Gleichungen, die FEM-gerecht formuliert und über zahlreiche trickreiche und wissensgestützte Zurichtungen auf das vorliegende Problem bezogen wurden. Damit ist die Modellstruktur im wesentlichen umrissen. Diese formale Struktur enthält nun zahlreiche Größen, die in Abhängigkeit von dem speziellen zu simulierenden System angegeben werden müssen. Solche „Systemparameter“ sind z. B. Abmessungen einer konkreten Realisierung einer Maschine, wie etwa die Dicke eines Balkens, oder Kennwerte technischer Komponenten, wie z. B. der Durchflußkennwert eines Ventils. Andere Systemparameter kennzeichnen das Verhalten der verwendeten Materialien. So muß etwa für eine Flüssigkeit die Dichte oder für einen Stahl die Dehnbarkeit angegeben werden. Alle diese Kennwerte, über die Besonderheiten lokaler Verhältnisse in das universelle Modell eingebaut werden, müssen am konkreten Objekt durch Messungen

35 Von linearem Systemverhalten spricht man, wenn sich die Reaktion des Systems auf mehrere Eingangssignale aus einer Überlagerung der Einzelreaktionen bestimmen läßt (Superpositionsprinzip). Reale Systeme sind immer nichtlinear, unter besonderen Bedingungen (z. B. nur kleine Anregungen um einen festen Arbeitspunkt) kann jedoch „linearisiert“ werden. Lineares Systemverhalten ist bedeutend einfacher zu behandeln als nichtlineares.

oder Versuche bestimmt werden. Diese Zurichtung des Konkreten für das Universelle ist, obwohl sie in den Modellierungslehrbüchern oft als reine Formalität behandelt wird, keineswegs eine einfache Angelegenheit. Gerade bei den Messungen der technischen Komponenten tritt oft eine Widerspenstigkeit des Objektes zutage, der wiederum nur mittels einschlägiger Erfahrung mit eben gerade diesem Exemplar von technischem Artefakt begegnet werden kann.

Auch bei der Erfassung des Verhaltens der Materialien und dessen Formalisierung in Modellparametern treten zahlreiche Schwierigkeiten auf. In unkomplizierten Fällen, wie z. B. bei der Beschreibung bestimmter standardisierter Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe, handelt es sich um einfache Zahlenwerte, die nur aus entsprechenden Tabellen entnommen und dem FEM-Programm eingegeben werden müssen. Die meisten professionellen FEM-Programme enthalten eigene Datenbanken mit den einschlägigen Daten zu Werkstoffen und Arbeitsmedien. Bei halbwegs komplexen praxisrelevanten Modellierungen reichen solche einfachen Rückgriffe auf standardisierte Kennwerte jedoch nicht aus. Die Vielfalt und Komplexität des Verhaltens realer Werkstoffe erweist sich vielmehr als eines der wesentlichen Hindernisse bei dem Bestreben nach immer genauerer Beschreibung materieller Strukturen. Konnte nämlich bei den früher üblichen ingenieurmäßigen Abschätzungen das Werkstoffverhalten „über den Daumen gepeilt werden“, da es sich ohnehin um Mittelungen über mehrere Einsatzbereiche handelte, so macht dies wenig Sinn, wenn der Anspruch auf die Ermittlung detaillierter Einzelaussagen über spezielle Fälle besteht. Die Gewinnung der dazu notwendigen genauen Angaben bereitet jedoch einige Schwierigkeiten. Selbst bei dem so gründlich untersuchten und normierten Stahl treten Probleme auf. Denn die durchaus vorhandenen ausführlichen Tabellen von Werkstoffkennwerten, gelten in der Regel für genormte Proben, wie etwa den „Zugstab“. Die Werte für reale, schon bearbeitete Bauteile können davon abweichen. Zudem sind reale Materialien nie ganz einheitlich in ihren Eigenschaften. Sowohl innerhalb einer Gruppe von Bauteilen aus dem gleichen Werkstoff als auch innerhalb eines einzigen Bauteils können Abweichungen auftreten. Selbst für einfache Werkstoffkennwerte weisen die Angaben in den Tabellenwerken erhebliche Bandbreiten auf. Zusätzliche Schwierigkeiten entstehen, wenn nichtlineares Materialverhalten erfaßt werden soll. Ein solches tritt z. B. bei Belastungen unter extremen Temperaturen, zusätzlicher chemischer Beanspruchung oder auch bei plastischen Umformungen auf. Kunststoffe verhalten sich grundsätzlich nichtlinear und weisen zudem zeitabhängige Eigenschaften auf. Um Phänomene wie „zeitabhängiges Kriechen“ oder „Versprödung“ zu beschreiben, reichen einfache Kennwerte nicht mehr aus. Stattdessen wird die Einarbeitung ganzer Verhaltensspektren nötig. Für jede einzelne Modellierung müssen hier spezielle Versuche durchgeführt werden, um die entsprechenden Kennkurven zu ermitteln. In manchen Fällen werden eigene empirische Modelle einprogrammiert, aus denen für jeden Fall Stoffwerte ermittelt werden.³⁶ Aus diesen Gründen ist für eine praxisrelevante FEM-Modellierung, nicht nur zur Bestimmung der Modellparameter, sondern auch um festlegen zu können, welche Einflüsse in die Modellierung einbezogen werden müssen, da sie für das Verhalten der beteiligten Materialien relevant sind, ein breites theoretisches und praktisches Wissen über die Eigenschaften von Werkstoffen notwendig.

³⁶ Vgl. z. B. Petrovic (1995). Hier werden verbesserte empirische Korrelationen für die Kenngrößen von Wasserdampf entwickelt, um eine realistischere FEM-Modellierung von Turbinen im Teillastbetrieb zu ermöglichen.

Empirische Modellanteile

Häufig reicht die oben beschriebene Parametrierung des Modells durch Kennwerte oder selbst durch Kennverläufe oder Kennfelder nicht aus, um die Verbindung zwischen naturwissenschaftlich analytisch-universeller Beschreibung und konkreter lokaler Einzelfallerfassung zu schlagen. Fast immer bleiben Restbestände an wichtigen Zusammenhängen, für deren Beschreibung kein naturwissenschaftlicher Ansatz zur Verfügung steht. In solchen Fällen wird auf empirische Modelle zurückgegriffen. Dabei werden z. B. qualitative, physikalisch basierte Hypothesen mit statistischen Ansätzen zur Beschreibung von Zusammenhängen gemessener Größen kombiniert. Ein prominentes Beispiel ist das Phänomen der Turbulenz in Strömungen, das in vielen praktisch relevanten Strömungssystemen auftritt, bisher aber nur durch empirische Modelle beschrieben werden kann. Dazu schreiben die zwei „Turbulenzexperten“ Parviz Moin und John Kim (1999, S. 49):

„Zur Zeit experimentiert man mit sogenannten Ad-hoc-Modellen, die nicht auf theoretischen Ableitungen beruhen, sondern schlicht empirisch gewonnene Zusammenhänge widerspiegeln und bei Testproblemen, deren Lösung man kennt funktionieren. [...] In all diesen Modellen stecken vereinfachende Annahmen über die Natur der Turbulenz; Sie enthalten einstellbare Parameter, deren Werte durch Abgleich mit Experimenten gewonnen wurden. Gegenwärtig sind deshalb alle numerischen Simulationen gemittelter turbulenter Strömungsfelder nur so gut wie die verwendeten Modelle [zur Beschreibung der Turbulenz P.W.].“

Aber auch für viele Phänomene in gängigen Modellierungen des Maschinenbaus ist die Einarbeitung empirischer Zusatzmodelle unerlässlich. Die ausführliche Darstellung einzelner Fallstudien weiter unten wird zeigen, daß für solche Modellierungen unterschiedliche Wissenstraditionen auf der Basis soliden Erfahrungswissens miteinander verknüpft werden müssen.

Die beiden zuletzt betrachteten Schritte von FEM-Modellierungen bestätigen damit die Vermutung, daß für die praktisch bedeutsame Formalisierung von Welt auch zum Zwecke der Computersimulation nach wie vor die Bildung von „Objektklassen“ nötig ist, für die dann funktionierende Kombinationen von Techniken der Wissensproduktion entwickelt werden. Für die FEM-Modellierung gehören zu einem solchen Paket neben Kombinationen numerischer Algorithmen mit FEM gerechten Formalisierungen von Objekten und naturwissenschaftlich basierten Theoriebündeln vor allem auch eine Reihe aussagekräftiger empirischer Modelle und detaillierte Beschreibungen realen Materialverhaltens.³⁷ Erst wenn diese Komponenten reibungslos zusammenarbeiten, kann die FEM ihre Wirkungsmacht entfalten.

Zwischenbilanz zur Idealisierung

Die bisher beschriebenen konzeptionellen Modellierungsschritte enthalten wesentliche Entscheidungen, die festlegen, auf welche Weise das FEM-Modell den betreffenden Weltausschnitt repräsentiert. Welche Fragen ein FEM-Modell beantworten kann, hängt wesentlich davon ab, wie die beschriebenen Übersetzungsschritte gestaltet werden. Wenn somit, wie gezeigt, der Zweck der Modellierung in jeden einzelnen Ideali-

37 Vgl. Chapmann (1979, S. 1300): „Although no single ‘universal’ model of turbulence may be found, a limited class of models may be found which applies to representative classes of flows of practical aerodynamic interest.“

sierungsschritt einfließt, so bedeutet das auch, daß der Zweck nur so gut erfüllt werden kann, wie die einzelnen Schritte durchgeführt wurden. In den einschlägigen Lehrbüchern wird daher immer wieder betont, daß die Idealisierung zahlreiche Fehlerquellen (im Sinne einer mangelhaften Erfüllung des Modellzwecks) enthält. So warnt der FEM-Experte Fröhlich (1995):

„Die schwerwiegendsten und am schwierigsten zu behebenden Fehler treten im ersten Teil einer Analyse, während der Erarbeitung der Aufgabenstellung und der Modellbildung auf. Die Systemgrenzen werden zu flüchtig überdacht, die Lagerungsbedingungen zu grob vereinfacht, oder die Aufgabe wird unzulässigerweise linearisiert, obwohl ein stark nichtlineares Verhalten vorliegt. Die Gründe für diese Fehler liegen meist in unzureichenden Grundkenntnissen der Mechanik und mangelnder konstruktiver Erfahrung bei der Abschätzung und Beurteilung des Bauteilverhaltens“ (S. 49)

Und ganz ähnlich Müller/Groth (1999):

„Dieser Schritt ist außerordentlich bedeutend für eine ökonomische und fehlerfreie Lösung der Aufgabenstellung. Und nur durch den Ingenieur ist die Idealisierung auszuführen“ (S. 182)

Gleichzeitig wird jedoch immer wieder betont, daß die Kenntnis der Prinzipien der FEM unabdingbare Voraussetzung für eine erfolgreiche Modellierung ist.

Für alle Schritte der Idealisierung, die von dem Ausschnitt aus der Wirklichkeit zum FEM gerechten numerischen Modell führt, können somit ähnliche Beobachtungen festgehalten werden. Stets sind spezifische Durchmischungen klassischen ingenieurmäßigen Vorgehens mit FEM-spezifischem Wissen vonnöten. Immer fließen neben analytischen Anteilen auch empirische Elemente in die FEM-Modellierung ein. Jeder einzelne Schritt der FEM-Modellierung ist in hohem Maße auf ein Vorverständnis der beteiligten Vorgänge angewiesen. Andererseits wird die Umsetzung dieses Wissens in das Modell stark von den Anforderungen des Modellierungsverfahrens strukturiert. Ohne ein Wissen um die Eigenschaften der FE-Methode und der numerischen Mathematik und ohne genaue Kenntnis des verwendeten Computerprogramms kann keine FEM-Modellierung erfolgreich sein.³⁸ Damit wird deutlich, daß es sich nicht einfach um die Anwendung zusätzlicher Hilfsmittel bei der Umsetzung klassischer Ansätze handelt, sondern daß in der wechselseitigen Durchdringung von altem und neuem Wissen etwas qualitativ Anderes entsteht. FEM-Modellierung muß als eine eigene Form der technischen Generierung, Verarbeitung und Anwendung von Wissen über Welt angesehen werden.

Dieses Zwischenergebnis soll für die abschließende Analyse der epistemischen Eigenschaften der FEM als erster Anhaltspunkt festgehalten werden. Zunächst sind jedoch noch weitere Schritte auf dem Weg zum gebrauchsfertigen im Computer installierten FEM-Simulationsmodell zu nennen.

38 So führt Fröhlich (1995, S. 49) in seinem Schaubild zu „Häufigen Fehlerursachen der FE-Analyse“ gleichberechtigt die Faktoren „Mangelnde Grundkenntnisse in Mechanik, Festigkeitslehre und Werkstoffwissenschaften“ sowie „Mangelnde theoretische Grundkenntnisse zum Verfahren der Finite Elemente Methode“ sowie „mangelnde Übung im Umgang mit dem FE-Programm“ an.

3.4.4 Weitere finite Formalisierungen

Während die beschriebene Idealisierung im wesentlichen stattfindet, bevor überhaupt ein Computer eingeschaltet wird, werden die nachfolgenden Schritte meistens schon mit der Unterstützung spezieller Software durchgeführt. Zunächst muß das zu modellierende Gebiet mit dem Netz aus den gewählten Finiten-Elementen überzogen werden. Weiter oben wurde schon erwähnt, daß die Feinheit der Vernetzung einen erheblichen Einfluß auf die Genauigkeit der Lösung hat. Viele kleine Elemente liefern in der Regel genauere Ergebnisse als wenige große Elemente, da sich der Diskretisierungsfehler verringert. Außerdem steigt mit der Anzahl der Elemente die Zahl der Knoten und damit der Stellen, an denen Werte berechnet werden. Ein feineres Netz bedeutet aber, wie schon mehrfach erwähnt wurde, größere Gleichungssysteme und damit längere Rechenzeiten. Daher wird versucht, das Netz nur an besonders kritischen Stellen zu verfeinern. Dafür muß allerdings schon eine Erwartung vorliegen, wo sich solche Stellen befinden. Manche Programme ermöglichen es, daß das Netz automatisch verfeinert wird, wenn der Näherungsfehler zu groß ist.³⁹ Ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Vernetzung ist jedoch auch die Möglichkeit, Einwirkungen aus der Umgebung abzubilden. Da nur an Knoten von Elementen Einflüsse von außen modelliert werden können, müssen solche auch vorgesehen werden, wo Einwirkungen auf das System auftreten.

Weitere Auswahlsschritte, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann, die aber ebenfalls einen großen Einfluß auf die Repräsentationsfähigkeit des Modells haben, sind die Bestimmung der Ansatzfunktion für die Elemente und die damit zusammenhängende Festlegung der Elementform.⁴⁰ Unterschiedliche Formen von Elementen unterscheiden sich in ihrem Konvergenzverhalten aber auch bezüglich des Modellierungsaufwandes und der Rechenzeiten. Als Regel für das entstehende „Netzmuster“ gibt ein Lehrbuch an: „Ästhetische Netze liefern gute Ergebnisse“ (Müller/Groth 1999, S. 206).

3.4.5 Das Simulationsexperiment

Sind alle beschriebenen Übersetzungsschritte vollzogen, und ist das Modell mit Hilfe des Computerprogramms, das zur FEM-Berechnung eingesetzt wird, in eine von dem Digitalrechner verarbeitbare Form übertragen, ist der betrachtete Weltausschnitt im Computer rekonstruiert. Er kann nun – ganz wie das präparierte Objekt im klassischen Labor – der gezielten „Befragung“ unterworfen werden. Diese Auswertung des Modells unter verschiedenen Bedingungen, die, wie es in Abschnitt 1.3.1 beschrieben wurde, den Kern der eigentlichen Simulation bildet, wird in vielen Veröffentlichungen als „numerisches Experiment“ bezeichnet. Eine Diskussion der Berechtigung dieser Bezeichnung findet sich in Abschnitt 3.4.15. Hier sollen zunächst die verschiedenen Anteile eines solchen Computerexperimentes vorgestellt werden.

Lösung des Gleichungssystems

Um aus dem nun vorliegende FEM-Modell Informationen zu gewinnen, müssen die in der Modellierung aufgestellten diskretisierten Gleichungssysteme gelöst werden. Die Lösungen geben dann an, wie sich das System unter den als Rand- und Anfangs-

³⁹ Als Maß für den Näherungsfehler dient die Abweichung zwischen den Ergebnissen, die aus zwei benachbarten Elementen für den zwischen ihnen liegenden Knoten errechnet wurden.

⁴⁰ Zu unterscheiden von dem Elementtyp!

bedingungen formulierten Vorgaben verhält. Mit dem eigentlichen Verfahren, nach dem die Gleichungen gelöst werden, hat der FEM-Anwender dabei in der Regel wenig zu tun. Die enorm vielen Umordnungen, die im Computer vorgenommen werden, um aus den getroffenen Angaben über das Modell ein algebraisches Gleichungssystem zu generieren und dieses zu lösen, bleiben unsichtbar. Dennoch kann es im Verlauf der Untersuchung immer wieder nötig werden, die Black-Box des Lösungsalgorithmus zu öffnen. Manche Probleme, die bei einer Berechnung auftreten, können durchaus in der mathematisch numerischen Vorgehensweise begründet sein.

Visualisierung

Die berechneten Ergebnisse werden von dem sogenannten „Postprozessor“ des FEM-Programms graphisch aufbereitet. Diese Visualisierung ist kein verschönernder Luxus sondern unerlässlich für die Auswertung der Ergebnisse, da die große Menge von Zahlenwerten, die bei den Berechnungen als Lösung herauskommt, nicht direkt interpretierbar ist. Die Einflußmöglichkeiten des FEM-Anwenders auf die Art dieser Aufbereitungen sind je nach Programm, Anwendungssituation und Vertrautheit mit dem Postprozessor sehr unterschiedlich. Ob mit oder ohne Nutzereingriff führt jedoch von dem „Zahlenhaufen“ zur anschaulichen Computergraphik eines zerquetschten Automobils oder gar einer animierten Darstellung eines Crashtests eine lange Folge von Übersetzungen. Diese ungeheuer wirkungsvolle Produktion visueller Repräsentationen der Ergebnisse technikwissenschaftlicher Forschung wird in Kapitel 4 ausführlich behandelt. Methoden wie die FEM können dabei als die wesentlichen Lieferanten der dort diskutierten Visualisierungen gelten.⁴¹ Bunte Bilder von umströmten Flugzeugen oder erwärmten Klimazonen, wie sie häufig in der Öffentlichkeit präsentiert werden, beruhen in der Regel auf Berechnungen mit der FEM oder verwandten Verfahren. Da die FEM in fast jedem Stadium ingenieurwissenschaftlichen Arbeitens beteiligt ist, stellt sich hier die in Kapitel 4 behandelte Frage nach einer „neuen Bildlichkeit“ ingenieurwissenschaftlichen Denkens in besonderer Deutlichkeit. Andererseits wirft die hohe Verbreitung kommerzieller Software bei der Anwendung solcher Verfahren besonders stark die Problematik der Strukturierung von Wahrnehmung durch vorgegebene Codierungen auf.

In der FEM-Fachliteratur gibt es dementsprechend kritische Stimmen zu der „einfachen“ Produktion bunter Bilder mit kommerzieller FE-Software:

„Die größte Gefahr der Fehleinschätzung geht heute von der psychologischen Seite aus: Die mit Hilfe des Computers dargestellten Ergebnisse sind heute grafisch so hervorragend aufbereitet, daß es schwerfällt an Fehler zu denken. Selbst die mit diesem Medium umgehenden Ingenieure erliegen oft der Faszination der bunten Bilder“ (Fröhlich 1995, S. 50)

In Kapitel 4 wird es allerdings nicht im Sinne dieser Warnung darum gehen, auf die Gefahr der Verbreitung „falscher“ Simulationsbilder hinzuweisen. Dort wird vielmehr jede visuelle Repräsentation technikwissenschaftlicher Forschungsergebnisse als ein Konstrukt beschrieben, in der auf kulturelle Codierungen zurückgegriffen wird,

41 Dies liegt zum Einen an der hohen Verbreitung dieser Methoden, zum Anderen aber auch daran, daß hier Bewegungen oder Zustandsveränderungen konkreter Körper oder Strukturen Gegenstand der Simulation sind. Im Gegensatz dazu eignen sich die Ergebnisse aus Simulationen mit konnektionistischen Systemen oder Fuzzy-Modellen eher wenig zur Produktion von eindrucksvollen Repräsentationen. Die graphische Aufbereitung der Ergebnisse spielt aber auch in diesen Techniken eine Rolle.

um den Zahlenkolonnen numerischer Berechnungen zusätzliche Bedeutungen zu verleihen. Im folgenden wird daher ohne Einbeziehung der Vermittlung durch die Visualisierung die Beurteilung der Ergebnisse von FEM-Berechnungen beschrieben.

3.4.6 Aus- und Bewertung der Rechenergebnisse

Das Ergebnis einer FEM-Berechnung gibt die Reaktionen materieller Strukturen auf Einwirkungen von außen an. Damit ist jedoch noch nichts darüber ausgesagt, wie diese zu interpretieren sind. Zunächst ist eine Abschätzung darüber erforderlich, wie genau die Berechnungsergebnisse aufgrund ihres Näherungscharakters überhaupt sein können. Es muß klar sein, welche Aussagen das Modell aufgrund der getroffenen Modellierungsentscheidungen machen kann und welche nicht. Dazu Fröhlich:

*„Die Finite Elemente Methode ist eine Näherungsmethode, deren Ergebnisgenauigkeit von vielen Faktoren abhängt. Die **Genauigkeit der Berechnung** muß vom **Anwender** abgeschätzt werden; dazu gehört viel konstruktive und methodische Erfahrung“* (1995, S. 163, Hervorhebungen im Original).

Auch der Abgleich der berechneten Ergebnisse mit experimentellen Daten ist keineswegs trivial und erfordert eine geschickte Navigation zwischen den beiden Realitätskonfigurationen. Versuche und Rechnungen müssen sorgfältig abgestimmt sein, damit ihre Ergebnisse überhaupt aufeinander bezogen werden können.⁴² Vor allem jedoch müssen aus den Ergebnissen der Berechnungen Aussagen abgeleitet werden, die für die Konstruktion der Artefakte verwertet werden können. So ist z. B. noch nicht viel damit gewonnen, wenn für ein Bauteil unter Belastung ein Spannungswert errechnet wurde. Entscheidend ist vielmehr die Frage unter welchen Bedingungen das Bauteil diese Spannung aushält. Dieser Schritt wird als Festigkeitsnachweis bezeichnet. Ein solcher Nachweis beinhaltet weit mehr als nur die von der FEM geleistete Berechnung der auftretenden Verformungen und Spannungen. Um die Zulässigkeit der Belastungen zu beurteilen, wird der berechnete Wert z. B. für eine Spannung in einem Bauteil, mit der höchsten Spannung verglichen, die für den entsprechenden Werkstoff zulässig ist. Auskunft über die Zulässigkeit geben – im Falle mechanischer Belastungen – die sogenannten Festigkeitskennwerte. Diese geben für einen Werkstoff für verschiedene Arten von Beanspruchungen zulässige Werte für deren Dauer und Höhe an (z. B. „Biegewechsel-Dauerfestigkeit“ oder „Verdrehdauerfestigkeit“). Solche Kennwerte sind sehr schwierig zu ermitteln und mit hohen Unsicherheiten behaftet. Sie unterliegen in noch höherem Maße als die einfachen Werkstoffkennwerte dem Einfluß lokaler Bedingungen des Bauteils und der Einsatzweise. Eine FEM-Berechnung liefert keinen solchen Festigkeitsnachweis. Dieser muß vielmehr nach wie vor auf klassische Weise durch die Entwicklungsingenieurin erbracht werden. Somit ist nur ein kleiner Teil technikwissenschaftlicher Tätigkeiten überhaupt der FEM-Analyse zugänglich. Für die Rückübersetzung bunter, makellos und universal gültig anmutender Visualisierungen in die komplexe, unwägbare Welt lokaler Betriebsbedingungen ist zusätzliches Wissen über die Welt erforderlich:

„Das alles [die Möglichkeiten des Postprozessors P.W.] schafft natürlich nur die Voraussetzung für die eigentliche Aufgabe des Berechnungsingenieurs: Er muß die Ergebnisse interpretieren und die entsprechenden Schlußfolgerungen daraus ziehen. Diese Arbeit kann ihm das FE-Programm nicht abnehmen. Ein schöner farbiger

42 Vgl. hierzu die ausführlichen Beispiele weiter unten.

Spannungsplot hat für sich alleine keinerlei Aussagekraft. Ohne fundierte Kenntnisse der Technischen Mechanik – insbesondere der Elastizitätstheorie – und der Werkstoffkunde können FE Ergebnisse nicht beurteilt werden. Die großen Möglichkeiten, die ein FE-Programm für eine vielschichtige Auswertung der durchgeführten Simulation bietet, können nur genutzt werden, wenn ausreichendes Wissen und Erfahrung über Spannungsarten, Festigkeitshypothesen und deren Aussagekraft und Verlässlichkeit vorhanden sind. Die Beurteilung, ob z. B. eine örtliche Spitzenspannung von 200 N/mm² bei einer geforderten Anzahl von Lastwechseln und bei einem bestimmten Vergütungszustand des Materials zulässig ist oder nicht, liegt nach wie vor beim Berechnungsingenieur.“ (Fröhlich 1995, S. 38)

Es ist auffällig, daß in dieser Äußerung, wie auch in einigen anderen der hier zitierten Statements von Technikschaaffenden, die Begriffe „Erfahrung“ und „Wissen“ einen besonderen Stellenwert einnehmen. Sie werden immer wieder als ein Schutz gegen die Gefahren fehlerhafter Technikentwicklung herangezogen. Ihre Anwendung wird häufig in Kontrast zu einer blinden Ausführung von Computerprogrammen und einer unkritischen Übernahme von deren Ergebnissen gesetzt. Dabei werden diese Begriffe in einer bestimmten Weise verwendet. So geht es einerseits um Kenntnisse aus dem klassischen ingenieurwissenschaftlichen Wissenskanon, wie er vor dem Aufkommen computergestützter Simulation bestand. Dieses Wissen wird als notwendig angesehen, um die Ergebnisse der FEM-Berechnungen kritisch beurteilen und sinnvoll interpretieren zu können. Andererseits ist die praktische Erfahrung in der Technikentwicklung angesprochen. Es wird damit impliziert, daß ein Ingenieur, der schon häufiger mit bestimmten Technikentwicklungen zu tun hatte, ein Wissen um die möglichen Probleme erwirbt, das sich aus rein theoretischen Analysen des Fachgebiets nicht herleiten läßt. Ein Ingenieur der gerade erste seine Universitätsausbildung abgeschlossen hat, wäre demnach in Gefahr, die FEM „falsch“ zu gebrauchen. Zusätzlich wird die Anwendung von Erfahrung als Gegensatz zu der routinemäßigen Verwendung gelernter Regeln oder dem bloßem „Rechnen“ gestellt. Damit wird ein Gegensatz konstruiert zwischen Erfahrung und Wissen als traditionellen ingenieurwissenschaftlichen Tugenden auf der einen und Computereinsatz auf der anderen Seite. Diese Entgegensetzung ist zwar problematisch, da sich keine so eindeutigen Abgrenzungen und Bewertungen der verschiedenen Formen von Wissen vornehmen lassen. Sie weist aber auf ein tatsächlich vorhandenes Spannungsverhältnis hin. Dieses besteht jedoch nicht zwischen „Erfahrung“ und „Rechnen“, sondern zwischen Wissen, das durch einen häufigen Umgang mit konkreten Anwendungsproblemen gewonnen wurde und solchem Wissen, daß sich gerade auf die Ermittlung von Regeln richtet, die unabhängig von dem einzelnen Anwendungsfall gelten. Ersteres Wissen wird in dem bestehenden Ausbildungssystem der Technikwissenschaften eher in langjähriger industrieller Praxis von einzelnen Personen im Verlaufe ihres Arbeitslebens gesammelt, während letzteres schwerpunktmäßig in der universitären Ingenieursausbildung vermittelt wird und personenunabhängig in verschriftlichter Form zugänglich ist. Wenn die Akteure der Technikentwicklung immer wieder auf die Bedeutung von „Erfahrung“ hinweisen, dann meinen sie, daß eine erfolgreiche Technikentwicklung nur möglich ist, wenn ein solches Regelwissen immer wieder mit dem an vielen Einzelfällen erprobten Praxiswissen rückgekoppelt wird. Sicher ist es kein Zufall, daß gerade im Zusammenhang mit der FEM dieser Hinweis so häufig auftaucht. Einerseits sind es gerade junge Ingenieurinnen, die von ihrer Ausbildung her vertiefte

Kenntnisse der FEM mitbringen, so daß diese Kenntnisse in Gegensatz zu dem Praxiswissen älterer Ingenieure geraten. Andererseits liegt es aber auch in der Natur einer Methode, die auf einer hochgradigen Formalisierung der Vorgehensweise beruht, daß lokales und personengebundenes Wissen nur bedingt einbezogen werden kann. Dieses Fehlen kann durch Anwender, die das Einzelfallwissen mitbringen, teilweise ausgeglichen werden. Die Methode selbst kann jedoch auch ohne dies Ergebnisse produzieren. Die Ausbreitung solcher wenig in der Praxis verwurzelter Lösungen technischer Probleme bei der Anwendung der FEM ist es, die als Gefahr für eine sichere Technikentwicklung empfunden wird.

In jedem Fall mischen sich beim Einsatz der FEM alte und neue Wissens Elemente in verschiedenen Formen. Sowohl bei der Modellierung (vgl. die Zwischenbilanz zur Idealisierung auf Seite 63) als auch bei der Auswertung von FEM-Berechnungen kommen klassische Methoden und erfahrungsgestützte Vorgehensweisen zum Einsatz. Andererseits kommen neue Wissensanteile dazu und müssen in den bestehenden Wissensbestand integriert werden. So wird von den einschlägigen Fachbüchern immer wieder darauf hingewiesen, daß – entgegen den anderslautenden Versprechungen einiger Anbieter von FEM-Software – für die allermeisten praktisch relevanten FEM-Berechnungen vertiefte Kenntnisse der FE-Methode nötig sind. Solches Verfahrenswissen ist z. B. unerlässlich, um bei dem Auftreten von Ungereimtheiten in den Berechnungsergebnissen FE-methodische von problemspezifischen Fehlern unterscheiden zu können. Dieser heterogene Anforderungskanon an die FEM-Modellierung führt in der Praxis zu Problemen. Fröhlich konstatiert:

„Man sollte sich darüber im klaren sein, daß nur eine bestimmte Anzahl der in der Praxis tätigen Konstrukteure die theoretischen Voraussetzungen zur Nutzung eines FE-Programmes besitzen“ (S. 152)

Mit dieser Feststellung ist der Übergang zur nächsten Ebene FEM induzierter Umordnungen eingeleitet. Denn nicht nur in den Köpfen einzelner Entwicklungsingenieure oder in den Lehrplänen der Ingenieursfakultäten finden mit dem Einzug der FEM Umstellungen statt. Auch die Organisation der Entwicklung, Konstruktion und Fertigung von Technik verändert sich im Zuge der Einführung der FEM.

3.4.7 FEM in der Praxis – Schnittstellen und andere finite Stolpersteine

In der einschlägigen Fachliteratur wird immer wieder betont, daß die Einführung von FEM in die industrielle Praxis in den betroffenen Betrieben erhebliche Umstrukturierungen mit sich bringt. Welche Brüche und Probleme dabei im Einzelnen auftreten, kann nur in empirischen Studien untersucht werden. Allein aus der Funktionsweise von FEM ergeben sich jedoch einige Reibungspunkte mit der bisher üblichen Praxis ingenieurwissenschaftlichen Arbeitens, die hier kurz aufgeführt werden sollen. Dabei soll deutlich werden, daß bei allen bisher beschriebenen Umordnungen und Übersetzungen materieller und formaler Strukturen immer auch Organisationsformen konkreter menschlicher Arbeit involviert sind.

CAD-FEM: Übersetzungsprobleme zwischen Stabil-Mobilen

Ein wesentliches Übersetzungsproblem bei der Einführung von FEM in die industrielle Praxis ist die Integration in den zuvor üblichen Ablauf der Koordination von Entwicklung, Konstruktion, Berechnung und Fertigung. Hierbei treten zunächst

schwerwiegende „technische“ Schwierigkeiten auf. Ein zentrales Problem ist die Übersetzung zwischen verschiedenen computergestützten Systemen innerhalb eines Betriebes. Vor allem der Transfer von Informationen zwischen dem FEM-System und dem ebenfalls computergestützten System zum Zeichnen und Konstruieren (CAD - Computer Aided Design) muß für einen erfolgreichen FEM-Einsatz unbedingt gewährleistet sein. CAD Systeme sind schon seit längerer Zeit in den Konstruktionsabteilungen fast aller Betrieben etabliert und haben die klassischen Zeichenbretter zum Großteil verdrängt.⁴³ Die CAD-Technologie hat die Produktion, Speicherung und Verarbeitung von Informationen über technische Artefakte rationalisiert und beschleunigt und die Einpassung der Informationen in andere Systeme technischer Verarbeitung erleichtert. Sie kann damit als ein „Stabil-Mobil“ angesehen werden, das in noch stärkerer Weise als die klassische technische Zeichnung die stabile und effektive Produktion „universellen“ technikwissenschaftlichen Wissens ermöglicht. Ein CAD-System bietet eine einheitliche Plattform, in der eine noch größere Zahl heterogener Elemente als in der technische Zeichnung „zusammengezogen“⁴⁴ und damit beherrscht werden kann. In der Regel ist ein Bauteil, das mit der FEM untersucht werden soll, über eine Zeichnung in einem CAD System beschrieben. Um nun einen Schritt der FEM-Modellierung wie die Diskretisierung – also die Aufteilung in die Finiten Elemente – durchzuführen, müssen zahlreiche praktische Übersetzungs-Probleme gelöst werden. Die CAD Zeichnung muß in das FEM-System transferiert werden und zwar so, daß das FEM-System die Daten auch verarbeiten kann.⁴⁵ Auf den ersten Blick sind diese beiden computergerechten Formalisierungsweisen eines Bauteils einander sehr ähnlich. In Wirklichkeit bestehen jedoch entscheidende Unterschiede. Während nämlich die CAD Zeichnung ein „Fertigungsmodell“ darstellt, basiert die FEM-Rechnung auf einem „Berechnungsmodell“. Entsprechend enthält die CAD Zeichnung zahlreiche Details, die für die Fertigung elementar wichtig, für die Rechnung jedoch uninteressant sind. Andererseits werden für ein FEM-Modell Informationen über die einzelnen Flächen benötigt, die aus einem dreidimensionalen CAD Modell nicht unbedingt zu entnehmen sind. Die geschilderte Problematik der CAD-FEM Schnittstelle ist keine Spitzfindigkeit am Rande, sondern eine der am meisten diskutierten Probleme bei der industriellen Einführung von FEM-Systemen. Aufwendige Nachbearbeitungen der schon fertig erstellten Zeichnungen eigens zum Zwecke der FEM-Analyse verlangsamten den Entwicklungszyklus erheblich. Zwar gibt es einzelne integrierte CAD-FEM Systeme, diese bieten aber gegenüber den üblichen FEM-Systemen deutlich weniger Berechnungsmöglichkeiten.

43 Eine ausführliche und spannende Untersuchung zur elektronisch gestützten und klassischen Zeichentechniken der Ingenieurwissenschaften als Techniken der Wissensproduktion und Organisation liefert Henderson (1999). Die von Henderson beschriebenen Umstrukturierungen ingenieurwissenschaftlicher Praxis, die mit der Einführung von CAD-Systemen einhergehen, zeigen durchaus Ähnlichkeiten mit den hier für die FEM angeführten Umbrüchen.

44 Bruno Latour beschreibt diese Funktion der Technischen Zeichnung als Plattform unterschiedlichster Einschreibungen in seinem Aufsatz „Drawing things together“ (1988, S. 52 ff).

45 Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren zur Speicherung von Geometriedaten. Einige Standards sind relativ etabliert, manche Branchen haben eigene Formate entwickelt, um die Kompatibilität zu sichern.

FEM und seine Akteure: Verschiebungen von Mensch-Maschine Schnittstellen

Mit den geschilderten, zunächst rein „technisch“ anmutenden Übersetzungsproblemen gehen zahlreiche Umverteilungen menschlicher Kompetenzen einher. Traditionellerweise werden die CAD-Systeme im wesentlichen in den Konstruktionsabteilungen der Betriebe eingesetzt, wo meist die Entwürfe der Entwicklungsabteilung ausgestaltet werden. Neuberechnungen gehören jedoch zur Entwicklung, so daß auch die FEM-Systeme meist eher dort angesiedelt sind. Damit ist das „Schnittstellenproblem“ nicht nur ein softwaretechnisches, sondern auch ein arbeitsorganisatorisches Anliegen. Fröhlich (1995, S. 167) konstatiert:

„Es kommt zu Verschiebungen bei der Arbeitsaufteilung zwischen Projektierung, Entwicklung und Konstruktion; Schnittstellen zwischen Berechnungsabteilung, Entwicklung und Konstruktion müssen neu definiert werden. Zuständigkeiten ändern sich, z. B. durch detailliertere konstruktive Vorgaben aus der Berechnungsabteilung für die Konstrukteure.“

Auch andere Bereiche wie z. B. die Versuchsabteilung, die ihre Versuche nun in enger Abstimmung mit der FEM-Berechnung durchführen muß, sind betroffen. Die Einführung von FEM kann somit keineswegs als reines „Zwischenschieben“ eines weiteren Analyseschrittes in der Entwicklung technischer Artefakte betrachtet werden. Vielmehr müssen im Zuge einer Einführung von FEM sämtliche Arbeitsabläufe im Hinblick auf dieses Verfahren umorganisiert werden. Ein einleuchtendes Beispiel für die dabei auftretenden Spannungen mit etablierten Vorgehensweisen ist die FEM gerechte Nachbearbeitung von CAD-Zeichnungen. Für deren praktische Umsetzung stellt sich die Frage, welche Akteure diese Übersetzung an welcher Stelle des Konstruktionsprozesses vornehmen sollen. Theoretisch wäre es möglich auf einen „frühen Konstruktionszwischenstand“ (Fröhlich S. 138) zurückzugreifen, in dem noch nicht so viele Details enthalten sind und diesen dann anstelle der detaillierten Fertigungszeichnung für die FEM-Berechnung zu benutzen. Fröhlich stellt jedoch fest:

„Diese sehr sinnvolle Methode ist in der Praxis leider kaum durchführbar. Das Konstruieren führt meist nicht systematisch vom Groben zum Feinen. Die Arbeitsweise des Konstrukteurs ist eher sprunghaft, er verfeinert hier, ändert an anderer Stelle aber auch sehr umfangreich, arbeitet iterativ und intuitiv mit sehr vielen Schleifen und Revisionen. Ein FEM gerechter Zwischenstand, den man abspeichern könnte, existiert also meistens nicht. Das Verfahren funktioniert nur mit einer an den Bedürfnissen der FE orientierten Arbeitsweise, die aber von einem normalen Konstrukteur nicht erwartet werden kann.“ (ebd.)

Oder in Bezug auf eine andere mögliche Vorgehensweise:

„Diese gute Möglichkeit zur Geometrievereinfachung bedingt aber ein sehr diszipliniertes Konstruieren nach festen Regeln, also ein Vorausplanen dessen, was für die spätere Vereinfachung notwendig ist.“ (ebd. S. 137)

Ansätze dazu, die technische Seite der Schnittstellenproblematik in den Griff zu bekommen, erfordern also Disziplinierungen der beteiligten Akteure und Umstellungen bisher üblicher Praxen. Die Strukturierungen der Konstruktionspraxis, die aus der Anwendung von FEM folgen, setzen auf die Vorgaben der CAD-Systeme nochmals auf, wenn eine FEM gerechte CAD Nutzung gefragt ist. Bei der industriellen Einführung von FEM-Systemen ist allerdings nicht unbedingt zu erwarten, daß auf eine

Möglichkeit, Reibungsverluste zu unterdrücken und damit Beschleunigung zu erreichen, alleine deswegen verzichtet wird, weil sie der üblichen Vorgehensweise nicht gerecht wird, wie das Peter Fröhlich anzudeuten scheint. Stattdessen kann davon ausgegangen werden, daß sich die Praxen häufig an den technischen „Notwendigkeiten“ orientieren müssen. Dabei treten jedoch erhebliche Schwierigkeiten auf. So führt die oben konstatierte Anforderung der FEM an anwendungsspezifische technische Kenntnisse einerseits und an Wissen über Computertechnik und Numerik andererseits, zugleich mit der Notwendigkeit einer engen Vertrautheit mit der speziellen FEM-Software zu einem Mangel an qualifizierten Fachkräften in den einzelnen Betrieben. Infolgedessen haben sich spezielle Berechnungs-Büros gebildet, in denen sogenannte Berechnungsingenieure nach den Vorgaben der beauftragenden Firmen FEM-Analysen durchführen.⁴⁶ Diese Lösung ist unter Umständen kostengünstiger als die Anschaffung der teuren Software und vor allem die Ausbildung eigener FEM-Fachkräfte. In manchen Firmen werden dagegen eigene Simulationsabteilungen eingerichtet. Dazwischen gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher, an die jeweiligen Firmenbedürfnisse angepaßter Modelle zur Integration von FEM-Berechnungen in die betrieblichen Abläufe.⁴⁷ Jede Lösung erfordert jedoch notwendig eine Umorganisation bestehender Strukturen.

3.4.8 Finite Software Elemente

Die Algorithmen für FEM-Berechnungen werden in aller Regel nicht für jede Anwendung von Grund auf neu in Computerprogramme gefaßt. Vielmehr werden bei fast allen industriellen und auch bei den meisten universitären Anwendungen kommerzielle Software Pakete zur FEM-Berechnung eingesetzt.

Eine solche FEM-Software besteht aus mehreren „Modulen“. Der „Preprozessor“ dient zur Erstellung des FE-Modells, in dem „Solver“ werden die eigentlichen Berechnungen durchgeführt, und die Ausgabe der Rechenergebnisse wird von dem „Postprozessor“ übernommen. In der Praxis trägt die Unterstützung der FE-Berechnung durch die Software erheblich zu der Effektivität des Verfahrens bei. Daher ist für die industrielle Anwendung der FEM die Weiterentwicklung der Software von ebenso großer Bedeutung wie die des Verfahrens an sich. Schlagworte, die in der Auswahl der Software eine entscheidende Rolle spielen, sind u. a.: Komfortable Benutzeroberflächen, interaktive Benutzerführung, einfache Veränderungsmöglichkeiten, leistungsfähige Schnittstellen zu den anderen Modulen, Integrierbarkeit in das CAD-System, ausführliche Datenbankfunktionen und einfache Modellverwaltung. Diese Kriterien spiegeln wieder, worauf es industriellen Anwendern bei dem Einsatz der FEM ankommt: Der stabile, schnelle Transport und der reibungslose Austausch von Daten-

46 Ein Beispiel für eine solche ausgelagerte Berechnung ist die schon erwähnte Analyse des Abgasventils. Diese wurde in einem Team „aus Konstrukteuren und Entwicklungsingenieuren des Herstellers und Berechnungsingenieuren eines externen Consulting Unternehmens“ durchgeführt. (Feldbausch/Friedmann 1998, S. 26). Die Autoren sind der Ansicht, daß jede einigermaßen komplizierte FEM-Berechnung von entsprechenden Spezialisten durchgeführt werden sollte (S. 30).

47 Nach der Studie von Reinhart und Feldmann (1997) hatten von 400 FEM-Anwendern 14% einen externen Dienstleister beauftragt und weitere 10% einen solchen zur Beratung hinzugezogen. 35% hatte eine eigene Simulationsabteilung eingerichtet und 41% hatten die Simulation in der betroffenen Fachabteilung durchführen lassen (S. 31). Fröhlich (1995, S. 12) konstatiert einen Trend zur Integration der FEM-Berechnungen in die jeweiligen Konstruktionsabteilung. Dabei beurteilt er diese – seiner Meinung nach von der Software Industrie angeschobene – Entwicklung sehr kritisch, da bei den Konstrukteuren nicht das nötige Spezialwissen vorhanden sei. Vgl. auch ebd. S. 151 und 154.

strukturen, die einsetzbare Repräsentationen der behandelten Weltausschnitte enthalten. Eine solche „Stabil-Mobilisierung“ wird von kommerziellen Softwarepaketen durch die Vorgabe fester Strukturen und gezieltes „Black-Boxing“ der komplexen Algorithmen erreicht. Auf diese Weise werden die Reibungsverluste der Übersetzung minimiert und damit der gesamte Vorgang von Modellierung und Simulation beschleunigt. Je mehr Transformationsvorgänge automatisch ablaufen, desto weniger Modellierungsentscheidungen können individuell durch den Bediener getroffen werden, um die Modellierung an spezifische Anforderungen anzupassen. Gleichzeitig wird die Modellierung jedoch mit zunehmender Übertragung wesentlicher Schritte an vorprogrammierte Algorithmen effektiviert und beschleunigt.⁴⁸ Je mehr Anbindungen an andere formalisierte Systeme wie etwa Datenbanken mit Werkstoffkennwerten, betriebsinterne Datenerfassungssysteme oder Norm- und Regelwerke existieren, desto größer ist die Reichweite der FEM als Werkzeug zur Produktion von wirkmächtigem Wissen. Die „ideale“ Software ermöglicht gleichzeitig mit dieser Stabilität ein Höchstmaß an flexibler Manipulierbarkeit der Datenstrukturen. So ist es ein immer wieder genannter Vorteil der FEM, daß ein einziges einmal angelegtes FE-Modell für eine Vielzahl unterschiedlicher Analysen verwendet werden kann. Dabei können die Auswirkungen von Veränderungen an dem Modell sofort in die veränderte Funktion übersetzt werden, ohne daß aufwendig neu modelliert werden muß. So konstatieren z. B. Rannacher und Stein (1999, S. 16):

„Ein großer Vorzug der Methode ist ihre Universalität: Ein und dieselbe Daten- und Programmstruktur taugt für die Behandlung so verschiedenartiger Bauteile wie Scheiben, Platten, Schalen und kompliziert geformter dreidimensionaler Körper. Dies erleichtert die Herstellung von Mehrzweck-Programmen für Standardaufgaben der Ingenieurpraxis.“

Die Wirkungsmacht der Formalisierung besteht in der Umformung eines heterogenen kontinuierlichen Gesamtzusammenhangs in einen Baukasten kombinierbarer und skalierbarer Einzelelemente. Die Software bestimmt entscheidend darüber mit, wie sehr dieser Effekt zur Geltung kommt. Desweiteren bestehen, wie weiter oben bei der Behandlung der Probleme in der Abstimmung der Arbeitsorganisation auf die Erfordernisse der FEM deutlich wurde, zwischen der Software und den Formen lebendiger Arbeit strukturierende Anknüpfungen. Welcher Vorgang in welcher Abteilung und von welchen Personengruppen ausgeführt werden kann und wie dabei die Kompetenzen verteilt sind, wird unter anderem auch von der Software mitbestimmt. So äußert z. B. Karl Schweizerhof (1999, S. 24) von der Software-Firma CAD-FEM:

„Zugleich wird daran gearbeitet, die Programme mit einer so geschickt gebauten Benutzeroberfläche zu umgeben, daß auch Konstrukteure ohne große Erfahrung und Methodenkenntnis eine Vielzahl von Standardberechnungen durchführen können“

Ein anderes Statement verdeutlicht den Zusammenhang zwischen der Beschleunigung einzelner Komponenten, ihrer Integration in eine einheitliche Struktur und der Form, in der zu ihrer Auswertung zusammengearbeitet wird:

⁴⁸ Diese Entwicklung wird auf die Spitze getrieben, wenn FEM-Programme Algorithmen zur automatischen Optimierung (etwa der Form) von Bauteilen enthalten. Diese Möglichkeit ist zwar durchaus angedacht, bisher aber noch nicht ernsthaft realisiert.

„Das langfristige Ziel von modernen, interaktiven Simulationsverfahren ist, daß Entwicklung- und Berechnungsingenieur direkt, etwa telekooperativ, zusammenarbeiten. Die Simulationsergebnisse lassen sich per Knopfdruck von einem erweiterten CAD-System abrufen, die Berechnungen müssen nicht mehr in eine andere Betriebsabteilung ausgelagert werden. Um dies zu erreichen, gilt es, sämtliche Komponenten der numerischen Simulation zu beschleunigen und sie in eine interaktive Simulationsumgebung zu integrieren.“ Trottenberg (1999, S. 7)

Entscheidend ist es, daß mit der Software sowohl soziale und materielle Strukturen als auch formale Systeme, die – wie oben gezeigt wurde – ihrerseits schon sozialer Natur sind, zusammengeschnürt und strukturiert werden. Erst mit dieser vereinheitlichenden Strukturierung tritt eigentlich die durch die FEM mögliche Beschleunigung und Effektivierung technikwissenschaftlichen Handelns in Kraft. Die FEM-Software erweist sich, indem sie einen schnellen und stabilen Transport solcher Zusammenschlüsse erlaubt, auf deren Grundlage gezielte Eingriffe in die Welt möglich sind, als ein wesentlicher „Stabil-Mobilisator“ der Methode der Finiten Elemente.

3.4.9 Auf der Spur der finiten Wissensqualität – Vom Behälterdeckel zum Stabziehen

Zu Beginn dieses Abschnittes wurde die Frage nach einer qualitativen Bewertung der FEM als Wissenswerkzeug zunächst zurückgestellt. Stattdessen wurden bisher die mit einer FE-Modellierung verbundenen Übersetzungen und Umordnungen materieller und nicht materieller Strukturen zusammengestellt. Dabei hat sich gezeigt, daß durch die Kombination alter ingenieurwissenschaftlicher Praxen mit neuen Formalisierungstechniken und den Möglichkeiten der Computertechnik eine wirkmächtige Weise der Produktion technischen Wissens entstanden ist. Damit hat sich schon erwiesen, daß sich die Instrumentfunktion von Modellen durch FEM und ähnliche Methoden der Computersimulation erweitert, da diese die Möglichkeiten, auf der Basis von Modellen erfolgreich in der Welt zu intervenieren, vervielfachen. Im folgenden soll jedoch noch weiter danach gefragt werden, was das Wissen, das mit Methoden wie der FEM erzeugt werden kann, im Gesamtzusammenhang technikwissenschaftlicher Wissensproduktion auszeichnet. Sind es lediglich die in den Technikwissenschaften schon immer gestellten Fragen, die nun mithilfe der FEM endlich beantwortet werden können oder verschiebt sich womöglich die Art der Herangehensweise an technische Probleme? Werden traditionelle Methoden ergänzt und verfeinert oder im Zuge der FEM computergerecht umgebaut? Wie verhält sich die FEM zum klassischen Experiment – erfüllen die numerischen Experimente die gleiche oder andere Funktionen? Und wie ist der Einfluß des Methodenumbaus auf die entwickelten technischen Lösungen? Haben technische Artefakte, die mit Methoden der Computersimulation entwickelt werden, gemeinsame Merkmale oder entsprechen sie in einer besonderen Weise bestimmten Anforderungen?

Solche Fragen rühren an die zentrale These dieser Arbeit, die ja von einem wechselseitigen Zusammenhang zwischen technikwissenschaftlichem Methodenkanon und der Herausbildung soziotechnischer Strukturen. Grundlage für ihre Beantwortung muß eine epistemologische Bewertung der FEM als Wissenswerkzeug sein. Eine solche Analyse der Erkenntnisqualität von FEM soll im folgenden versucht werden. Dabei reicht es nicht mehr, wie bisher zur Verdeutlichung der prinzipiellen Arbeitsweise von FEM geschehen, einfache, lehrbuchmäßige oder zur Präsentation der FEM

Erfolge veröffentlichte Anwendungsbeispiele heranzuziehen. Stattdessen werde ich zunächst ausführlich einige Anwendungen vorstellen, die sich zum Ziel gesetzt haben, mit der FEM tatsächlich qualitativ neue Erkenntnisse zu gewinnen. Neben der Prüfung der Art des mit FEM erzeugten Wissens sollen diese detaillierten Beispiele dazu dienen, die schon diskutierten Übersetzungsschritte in ihrem praktischen Wirken aufzuspüren. Die Zusammenstellung der FEM-Anwendungen soll weder eine repräsentative Wiedergabe des Anwendungsbereiches noch des aktuellen Forschungsstandes darstellen. Es wurde jedoch bei der Auswahl Wert darauf gelegt, Beispiele aus sehr verschiedenen Anwendungsbereichen zusammenzutragen. Außerdem handelt es sich stets um Anwendungen auf konkrete technische Artefakte und nicht um Rechenexempel von rein akademischen Interesse. Die ausgewählten Anwendungen wurden allesamt im Rahmen von ingenieurwissenschaftlichen Dissertationen veröffentlicht. Dabei war jedoch stets, wie es in den Ingenieurwissenschaften sehr häufig der Fall ist, ein Bezug zu konkreten industriellen Projekten vorhanden. Dissertationen eignen sich aus mehreren Gründen besonders als Quelle für die hier angestrebte Analyse der FEM als eines Verfahrens der Wissensgenerierung. In der Regel werden in solchen Arbeiten die wesentlichen theoretischen Grundlagen des Fachgebietes zusammengefaßt und auf den vorliegenden Fall bezogen. Häufig wird zudem explizit reflektiert, welcher Erkenntnisgewinn gerade durch die numerische Behandlung des Problems gegenüber traditionellen Ansätzen entsteht. Darüber hinaus liefern die sehr ausführlichen Schilderungen der einzelnen Schritte bei der Problemlösung Informationen, die in dieser Weise in den üblichen ingenieurwissenschaftlichen Veröffentlichungen nicht zu finden sind. Es sollte jedoch nicht versucht werden, aus solchen akademischen Arbeiten auf die industrielle Praxis beim Einsatz von FEM zu schließen. Hier sind, wie es oben schon angedeutet wurde, weitergehende Umschichtungen auf anderen Ebenen involviert als bei Anwendungen, die vornehmlich dem Forschungsinteresse dienen. Für die hier angestrebte Darstellung der FEM als Vermittlungsinstrument bei der Übersetzung konkreter Realität in technologisch auswertbare Strukturen leisten universitäre Forschungsprojekte jedoch als Untersuchungsgegenstand gute Dienste.

3.4.9.1 Der Bajonettverschluß⁴⁹

Edgar Merkl hat sich in seiner Dissertation zum Ziel gesetzt, mithilfe der Finiten Elemente Methode das Verhalten von Behälterdeckeln mit Bajonettverschlüssen zu untersuchen. Bajonettverschlüsse werden eingesetzt, um Behälter zu verschließen, die von innen unter hohem Druck stehen. Dabei kommt es, laut Merkl, immer wieder zu Unfällen, die auf das unerwartete Versagen solcher Verschlüsse zurückzuführen sind. Die Motivation für Merkl's Untersuchung ist es, den Ursachen für dieses Phänomen auf die Spur zu kommen und, wenn möglich, Abhilfe zu schaffen. Zunächst möchte er ermitteln, wie ein konkreter, industriell eingesetzter Bajonettverschluß im Betrieb beansprucht wird und wie sich diese Beanspruchungen auf das Bauteil auswirken. Darauf aufbauend soll die Konstruktion optimiert und ein Leitfaden zur Konstruktion optimaler Bajonettverschlüsse entwickelt werden.

Merkl beschreibt zunächst das herkömmliche Auslegungsverfahren für Bajonettverschlüsse. Dabei stellt er fest, daß dieses auf stark vereinfachten Modellvorstellun-

⁴⁹ Edgar Merkl (1998): Auslegung von Bajonettverschlüssen. Dissertation am Lehrstuhl Apparate- und Anlagenbau Experimentelle Spannungsanalyse der TU-München. Alle Zitate des folgenden Abschnittes stammen aus dieser Veröffentlichung.

gen⁵⁰ beruht. Außerdem werden darin jeweils nur einzelne Aspekte der Beanspruchung berücksichtigt. Merkl konstatiert:

*„Ein **funktionaler Zusammenhang** zwischen Belastung, Geometrie, Spannungs- und Verformungszustand fehlt gänzlich“* (S. 11, Hervorhebung P.W.)⁵¹

Um einem solchen Zusammenhang näher zu kommen, wird nun in Merkl's Arbeit folgendes Vorgehen geschildert:

Zuerst wird ein „echter“ Behälter angeschafft und einer Druckprobe, wie sie vom TÜV für jeden Behälter vor Inbetriebnahme vorgeschrieben ist, unterzogen. Dieser Versuch wurde mit einem sehr großen meßtechnische Aufwand (72 Dehnungsmeßstreifen!) durchgeführt. Da der Behälter nach der Druckprobe vorgeformt ist, kann dieses Experiment nur einmal durchgeführt werden und wird daher mit äußerster Sorgfalt vorbereitet. Als besonders schwierig erweist es sich dabei, gerade diejenigen Größen zu messen, die das FEM-Programm später berechnen soll und die daher zur Verifizierung benötigt werden (z. B. die Dehnungen innerhalb einer Kerbe).

Parallel zu dem Laborversuch wurde ein FEM-Modell des Behälterdeckels entwickelt. Dabei wurden eigens Zugversuche mit dem Material des Deckels durchgeführt, um für das FEM-Modell realistische Werkstoffdaten zu gewinnen. Mit diesem Modell wurde die oben geführte Druckprobe simuliert. Das Laborexperiment wurde somit in einem numerischen Experiment nachvollzogen. Zusätzlich wurde ein sogenannter „spannungsoptischer Versuch“ durchgeführt. Dazu wird ein gegenüber dem Original verkleinertes physisches Modell des Behälters aus einem speziellen Material gefertigt, das bei Wärme sehr weich wird. Es reicht daher ein niedriger Druck um die reale Behälterbelastung nachzuahmen. Nach der Belastung kann das verformte Modell untersucht werden. Spezielle Umrechnungsformeln erlauben auch quantitative Rückschlüsse auf das Original.

Die Ergebnisse der drei Ansätze (Meßwerte aus Druckprobe/Simulationswerte für Druckprobe/spannungsoptischer Versuch) stimmten näherungsweise überein. Damit war das FEM-Modell prinzipiell verifiziert. Die Ergebnisse aller drei Verfahren zeigten zudem, daß die klassischen Annahmen darüber, wo die maximale Spannung auftreten würde, unzutreffend sind. Diese entscheidende Erkenntnis motivierte die weiteren Untersuchungen.

Nach den geschilderten Laborexperimenten versucht Merkl, die klassische mathematisch-physikalische Analyse der Vorgänge am Bajonettverschluß zu verbessern. Dazu werden neue Ansätze für Modellvorstellungen zur Beschreibung der einzelnen Komponenten und ihrer Beanspruchung vorgeschlagen. Daraus werden neue Formeln zur Bestimmung der auftretenden Spannungen und Verformungen hergeleitet. Die Ergeb-

50 Hier entsteht nun eine regelrechte Begriffsverwirrung wegen der unterschiedlichen Verwendung des Modellbegriffs (vgl. Kapitel 1 dieser Arbeit). Merkl (und viele andere ingenieurwissenschaftliche Veröffentlichungen) sprechen von Modellen, wenn zur Berechnung eines realen Bauteils eine vereinfachte abstrakte Struktur verwendet wird, für die passende Formeln bekannt sind. Beispiel: Die Pressung zwischen Deckel und Behälter kann aus dem Modell: „Stempel auf einer Halbebene“ berechnet werden. Um Konfusionen mit dem mathematischen Modell zu vermeiden, das Grundlage für Simulationsrechnungen ist, werde ich in solchen Fällen von einer „Modellvorstellung“ sprechen.

51 Von einem funktionalen Zusammenhang spricht man in den Ingenieurwissenschaften, wenn eine mathematische Gleichung (Funktion) vorliegt, in der alle entsprechenden Größen vorkommen. Mithilfe dieser Funktion kann dann ausgerechnet werden, wie sich die Veränderung einer der Größen auf die anderen auswirkt.

nisse aus den FEM-Rechnungen dienen dabei als Vergleichshintergrund für die analytischen Berechnungen. Eine wichtige Funktion des FEM-Modells bei der Suche nach zutreffenden funktionalen Zusammenhängen ist es außerdem, den Einfluß einzelner Größen abzuschätzen. So konnte z. B. durch verschiedene FEM-Rechnungen gezeigt werden, daß der Reibwert keinen großen Einfluß auf das Rechenergebnis hat. Damit kann dessen aufwendige experimentelle Ermittlung gespart und mit einer Abschätzung vorlieb genommen werden (vgl. S. 41). Zur eigentlichen Berechnung wird die Methode der Finiten-Elemente erst dann herangezogen, wenn die klassischen analytischen Mittel versagen. Dies ist vor allem bei der Ermittlung der Kerbspannungen an Deckel und Behälter der Fall. Der klassische Ansatz zur Ermittlung des „Formfaktors“, der die Auswirkung einer Kerbform auf die Spannung im Werkstück kennzeichnet, ist die Beschreibung des Deckels als „abgesetzter Flachstahl unter Biegebeanspruchung“. Diese Modellvorstellung beinhaltet jedoch, laut Merkl, eine dermassen grobe Vereinfachung, daß sie keine sinnvollen Ergebnisse liefern kann. Die Durchführung von Versuchen zur Ermittlung realistischer Formfaktoren ist zwar prinzipiell möglich, aber sehr aufwendig. Daher setzt Merkl zur Ermittlung des Formfaktors verschiedener Kerbformen an Deckel und Behälter die FEM ein. Auf diese Weise gelingt es ihm, eine „optimale“ Kerbform zu ermitteln.⁵²

Mit den neuen analytischen Ansätzen und den FEM-Berechnungen der Kerbe wird nun ein Berechnungsprogramm für Bajonettverschlüsse zusammengestellt. Für den alten, nach DIN-Vorschrift ausgelegten Verschuß werden Beanspruchungen festgestellt, die über den zulässigen liegen. Damit ist zu erwarten, daß dieser auch bei bestimmungsgemäßer Belastung vorzeitig versagen wird. Anschließend werden mit dem Programm alle wesentlichen Parameter des Deckels systematisch verändert. Daraus und aus einigen grundsätzlichen Überlegungen, die schon aus der Auswertung der Druckprobe folgten⁵³, wird eine neue Konstruktionsweise des Bajonettverschlusses vorgeschlagen. Diese wird gefertigt und im Versuch getestet. Außerdem wird ein FEM-Modell des neuen Deckels erstellt und numerischen Experimenten unterzogen. Sowohl der Laborversuch als auch das Computerexperiment zeigen eine deutliche Verringerung der Beanspruchung bei dem optimierten Verschuß. Dies bedeutet eine längere Lebensdauer und damit einen sicheren Betrieb bei zulässiger Belastung.

Folgende Beobachtungen im Hinblick auf die Frage nach der FEM als Werkzeug zur Erzeugung von Wissen können aus dem Beispiel festgehalten werden:

Ziel von Merkl's Untersuchung ist es, stärker als mit den klassischen Methoden in das Geschehen im Inneren des Bauteils vorzudringen. Die vorhandenen allgemeinen Gestaltungsrichtlinien sollen durch Regeln, die auf „funktionalen Zusammenhängen“

52 Diese Form ist laut Merkl (S. 67) interessanterweise schon 1934 vorgeschlagen worden. Damals wurde die Form aus einer Analogiebetrachtung zwischen dem Spannungsverlauf in einer Kerbe und der Ausbildung der freien Oberfläche einer ausströmenden Flüssigkeit hergeleitet.

53 So hatte schon die Betrachtung der Bauteile gezeigt, daß sich Deckel und Behälter unterschiedlich verformt und ineinander geschoben hatten, wodurch eine sehr ungünstige Kontaktspannung entstanden war. Diesem Phänomen konnte durch eine kleine Formänderung abgeholfen werden, die eine freiere Bewegung der Kontaktflächen erlaubte. Weiterhin hat der verbesserte analytische Ansatz für den Deckel zu einer größeren (!) Dicke geführt. Das bedeutet, daß die DIN Auslegung nicht auf der sicheren Seite war. Dies konnte auch nicht durch den vorgeschriebenen Sicherheitsfaktor ausgeglichen werden. Diese beiden Änderungen sind neben der Verbesserung der Kerbform die wesentlichen Bestandteile der Optimierung. Beide Formänderungs-Maßnahmen hätten ohne die Anwendung moderner Fertigungsverfahren (CNC-Technologie) nicht so einfach durchgeführt werden können.

beruhen, ersetzt werden. Dabei erweist sich jedoch die FEM keineswegs als die tragende Säule der Wissenserzeugung. Vielmehr werden aus qualitativen Überlegungen heraus neue physikalisch basierte Modellvorstellungen entwickelt. Die FEM dient als Hilfsmittel zu deren Findung und Verifizierung, liefert jedoch selbst die gesuchten „funktionalen Zusammenhänge“ nicht. Erst wenn, wie bei der Kerbform, keine Möglichkeit mehr gegeben ist, analytische Ansätze zu finden, wird die FEM herangezogen. Im Gegensatz zu den vorher hergeleiteten Berechnungsformeln, die eine allgemeine Gültigkeit besitzen, muß die FEM Berechnung – wie das klassische Experiment – für jeden Einzelfall immer wieder neu durchgeführt werden. Ihre Anwendung gleicht daher eher einem heuristischen Suchverfahren als einem analytischen Vorgehen. Der Vorteil gegenüber der Durchführung realer Versuche liegt nicht in einer prinzipiellen Überlegenheit, sondern vor allem in Zeit- und Kostenersparnis. Dennoch sind die realen Laborexperimente unverzichtbarer Bestandteil der Analyse. So hat das aufwendige Experiment in diesem Fall qualitative Einsichten in die Natur der Problematik vermittelt und schon wesentliche Hinweise auf Verbesserungsmöglichkeiten geliefert, ohne daß „funktionale Zusammenhänge“ in mathematischer Form überhaupt ins Spiel gekommen wären. Einmal am Versuch verifiziert, gewinnt das FEM-Modell jedoch eine gewisse Autonomie bei der Wissenserzeugung. Die Verifizierung erfordert allerdings einen sehr großen Aufwand.

Die FEM erweist sich hier als einer von vielen Bausteinen in einem komplexen Gesamtzusammenhang technologischer Wissensproduktion. Ihre wesentlichen Funktionen sind die Vermittlung zwischen Versuch und Theorie und die Beschleunigung der Suche nach funktionierenden Kombinationen von Weltbeschreibung.

3.4.9.2 Die Windkanalwaage⁵⁴

Windkanäle sind spezielle Experimentiereinrichtungen für aerodynamische Untersuchungen. Vor allem Flugzeuge und einzelne Flügelprofile werden in Windkanalversuchen auf ihre Strömungseigenschaften hin getestet. Dabei werden in der Regel Modelle der entsprechenden Bauteile gefertigt und im Windkanal verschiedenen Strömungsverhältnissen ausgesetzt.⁵⁵ Windkanalwaagen werden eingesetzt, um die Belastungen zu messen, die an den Bauteilen während eines solchen Versuches auftreten. Es handelt sich bei solchen Waagen um Stahlstrukturen, in denen biegsame Elemente (Federpakete) gezielt so angeordnet sind, daß sie sich bei bestimmten Belastungen verformen. Während eines Windkanalversuchs werden sie an dem Modellobjekt montiert. Aus den Verformungen der Federn werden dann einzelne Kraftkomponenten bestimmt. Die Waage unterliegt dabei großen Belastungen bei gleichzeitig sehr hohen Anforderungen an die Meßgenauigkeit. Daraus ergeben sich für die Konstruktion solcher Waagen zahlreiche Probleme. Besonders schwierig ist es zu erreichen, daß sich nicht jede Verbiegung auf alle Meßstellen statt nur auf die eine dafür vorgesehene auswirkt und damit die Meßergebnisse an den anderen Stellen beeinflusst (Interferenz). Die Arbeit von Zhai ist daher der „Analyse und Optimierung“ von Windkanalwaagen

54 Junnai Zhai (1996): Analyse und Optimierung der internen Windkanalwaage mit FEM. Dissertation am Fachgebiet für Aerodynamik und Meßtechnik der TH Darmstadt. Alle Zitate des folgenden Abschnittes stammen aus dieser Veröffentlichung

55 Damit die Ergebnisse auf reale Größenordnungen übertragen werden können, müssen die charakteristischen Größen bestimmte Ähnlichkeitsmerkmale erfüllen. Dies führt dazu, daß einige Versuche, etwa zu Kampfflugzeugen, die unter extremen Bedingungen belastet werden, unter sehr hohem Druck oder bei sehr tiefen Temperaturen (Kryo-Windkanal) durchgeführt werden.

mit der FEM gewidmet. Es handelt sich damit um den Versuch einer „Strukturoptimierung“ also einer Veränderung der Geometrie zu Verbesserung der Funktion. Als „Zielsetzung der Arbeit“ beschreibt Zhai (S. 14):

*„Um die Windkanalwaage durch strukturelle Maßnahmen zu verbessern, muß man zuerst **das Verhalten** der Waage unter der mechanischen und thermischen Belastung **gut verstehen**. Daraus können Ansätze für verschiedene Verbesserungsmöglichkeiten gefunden werden. Eine geeignete Methode für diese Aufgaben ist das numerische Simulationsverfahren. Mit dieser Methode ist es relativ einfach, die Auswirkung von Einzelfaktoren zu bestimmen und die entsprechenden Maßnahmen zu treffen“* (S. 14, Hervorhebungen P.W.)

Es wird folglich ein FEM-Modell für eine existierende Windkanalwaage entwickelt. Mit diesem Modell werden dann verschiedene Untersuchungen darüber angestellt, wie sich die Waage bei bestimmten Belastungen verhält. Daraus lassen sich wiederum Aussagen über die Ursachen von Meßungenauigkeiten machen. Zhai versucht dabei, soweit es möglich ist, klassische Modellvorstellungen heranzuziehen, um das Verhalten der Waage zu erklären und daraus qualitative Aussagen über mögliche Verbesserungen herzuleiten. Die Ergebnisse der FEM Rechnungen dienen dann lediglich als Hinweis, in welche Richtung nach solchen Modellvorstellungen zu suchen ist, oder als Verifizierung der theoretischen Modelle. So werden zu jedem Untersuchungsfall zunächst FEM-Rechnungen durchgeführt. Aus den dort erhaltenen Verformungen werden Balkenmodelle hergeleitet, die die Waage für diesen Belastungsfall repräsentieren können.⁵⁶ Solche Balkenmodelle sind Hilfsvorstellungen zur Untersuchung eines Systems, wie sie für die klassische Ingenieurwissenschaft typisch sind. Mit ihrer Hilfe werden von Zhai funktionale Zusammenhänge zwischen Konstruktionsparametern und Meßgenauigkeit hergeleitet und mit der FEM überprüft. Meist zeigt sich dabei eine Übereinstimmung der Ergebnisse. Lediglich in einigen wenigen Fällen liefern die FEM-Untersuchungen Hinweise darauf, daß das Balkenmodell die Verhältnisse nicht richtig wiedergibt. In einem Fall konnte über die FEM-Rechnung ein optimaler Wert für einen Parameter (den Abstand zwischen den Meßfedern) gefunden werden. Zhai untersucht neben den mechanischen Eigenschaften auch das Temperaturverhalten der Waagenkonstruktionen und leitet aus seinen Ergebnissen einige Regeln für die Konstruktion von Windkanalwaagen her. Er selbst entwickelt eine neue Waagenform, die den Anforderungen besser als die alte Waage genügen soll. Dabei treten jedoch einige Probleme zutage:

- Die einzelnen Regeln und Kriterien widersprechen sich: So wird z. B. durch eine Maßnahme die Interferenz auf eine Meßstelle erniedrigt, andere Störeinflüsse werden jedoch verstärkt (S. 53). Insgesamt besteht die Gefahr, daß bei der Erhöhung

⁵⁶ Siehe S. 47 oben: „Um den Zusammenhang zwischen dem auf die Meßfeder wirkenden Moment und den anderen Parametern zu ermitteln, wurde die Waage vereinfacht als ein Rahmen mit Balken modelliert. Mit diesem Modell kann man hoffentlich eine Richtlinie für die Optimierung herausfinden.“

der Meßgenauigkeit die Festigkeit verringert wird (S. 76). Eine besonders temperaturunempfindliche Waage weist eine hohe Störempfindlichkeit auf (S. 98).

- Mit der FEM gefundene „optimale Maße“ müssen genau eingehalten werden, da sich sonst das Verhalten selbst gegenüber dem alten Zustand verschlechtert (S. 53).
- Strukturen mit „optimalem Verhalten“ lassen sich manchmal nur schwierig fertigen (S. 81).

Zhai kommt in seiner Zusammenfassung daher zu dem Schluß:

*„In der Gesamtheit der Waage und ihrer Anforderungen kann es sein, daß die Optimierung hinsichtlich eines Ziels konträr zur Optimierung hinsichtlich einer anderen Anforderung ist. Hier muß durch eine geeignete Wahl der Parameter dann im Einzelfall ein guter Kompromiß gefunden werden. Die Qualität der dann gefundenen Lösungen kann überprüft werden, eine Optimierung ist aufgrund der vielen Parameter **rechnerisch nicht möglich, sie wird vielmehr aus der Erfahrung des Konstrukteurs definiert**“ (S. 156, Hervorhebung P.W.)*

Dennoch lassen sich aus Zhais Ergebnissen mit der Hilfe von FEM Spezialwaagen für ganz bestimmte Zwecke wie z. B. für Kampfflugzeuge im Kryo Kanal konstruieren.

Welche Erkenntnisse über die FEM und ihre Wirkungsweise lassen sich aus Zhais Untersuchung gewinnen?

Wieder geht es hier um die Gewinnung von Einsichten in innere Zusammenhänge, um ein „Verstehen“ der physikalischen Verhältnisse. Wesentliche Träger dieses Verstehens und vor allem der darauf gründenden Ansätze zur Verbesserung der Konstruktion sind aber – ganz ähnlich wie beim Bajonettverschluß – die klassischen Modellvorstellungen. Die FEM unterstützt lediglich bei deren Findung und Interpretation. Im Gegensatz zu Merkl gelingt es Zhai jedoch nicht, die unzähligen Einzelergebnisse seiner Analysen zu einer kohärenten, allgemein nutzbaren Optimierungsstrategie für die Auslegung von Windkanalwaagen zusammenzufassen. Dies liegt sicherlich an dem viel weiter gefaßten Anspruch einer Gesamt-Optimierung der Waage gegenüber dem eher bescheidenen Anliegen der Verbesserung der Betriebssicherheit des Bajonettverschlusses. Dies kann als Hinweis darauf interpretiert werden, daß die FEM die Wirkmächtigkeit technikwissenschaftlicher Ergebnisse zwar in ihrer Lokalität erhöhen kann, aber deren Geltungsbereich nicht schrankenlos auszuweiten vermag. Universalisierung findet auch bei Zhai lediglich in der Einleitung statt. Am Ende löst sich die Übersetzungskette in eine Vielzahl von Einzelergebnissen auf und die „Erfahrung des Konstrukteurs“ ist gefragt, um daraus real funktionierende technische Lösungen zu konstruieren. Eine mögliche Ursache für diesen Zerfall mag auch in der gegenüber dem Bajonettverschluß sehr geringen Verankerung der Untersuchung in klassischen Laborexperimenten liegen.

Dennoch ist die bei Zhai festzustellende Tendenz, mithilfe der FEM technologische Spezialzüchtungen voranzutreiben, durchaus ernst zu nehmen. Allerdings muß die Möglichkeit zu solchen Unternehmungen in hohem Maße auch den Weiterentwicklungen in der Fertigungstechnologie insbesondere den computergestützten mechanischen Bearbeitungsverfahren (CNC) zugeschrieben werden. Die FEM dagegen dient als wirkungsvolle Klammer verschiedener Techniken zur Auffindung sehr spezieller Wirkungszusammenhänge.

3.4.9.3 Der Axialverdichter⁵⁷

Die Berechnung des Strömungsverhaltens von Fluiden ist eines der wesentlichen Anwendungsfelder für die FEM und verwandte Methoden der computergestützten Simulation. In diesem Bereich hat sich ein eigenes Fachgebiet – die „Computational Fluid Dynamics“ (CFD) – herausgebildet. Die Anwendungen solcher CFD-Rechnungen sind äußerst vielfältig. Untersucht werden beispielsweise die Umströmungen fester Körper, wie etwa Karosserien von Kraftfahrzeugen, Flügelprofilen für Flugzeuge oder Turbinenschaufeln, aber auch Durchströmungen von Düsen oder Rohren, sowie die Verwirbelung von Gasen in Brennkammern. Schon geringe Verbesserungen der Strömungseigenschaften solcher Bauteile können große Ersparnisse z. B. an Treibstoff ermöglichen, so daß sich der hohe Aufwand für die Modellierung und Simulation auszahlt. Gleichzeitig ist die Berechnung „echter“ Strömungsverhältnisse eine der größten Herausforderungen an die numerischen Verfahren, da in den beweglichen Strömungen noch wesentlich mehr Einflüsse zu berücksichtigen sind, als bei festen Strukturen. Die numerische Lösung der vollen, dreidimensionalen⁵⁸ Grundgleichungen der Strömungsmechanik, der „Navier-Stokes Gleichungen“, erfordert einen erheblichen Aufwand an Modellierung und große Rechnerkapazitäten. Daher sind solche Berechnungen bisher nur in wenigen Bereichen üblich.⁵⁹ Verschiedenste Vorstufen einer numerischen Analyse realer Strömungsfelder sind jedoch mittlerweile ein etablierter Bestandteil vieler Entwicklungsvorgänge. An dem hier ausgewählten Beispiel der Auslegung eines Axialverdichters soll für die Strömungsrechnung, wie schon zuvor für die Beispiele aus der Strukturmechanik, untersucht werden, wie die neuen Ansätze in die alten Berechnungsverfahren integriert werden und welche Erkenntnismöglichkeiten dabei gewonnen werden.

Verdichter gehören zu den Strömungs-Arbeitsmaschinen. Sie werden durch einen Motor angetrieben und erhöhen den Druck eines gasförmigen Arbeitsmediums indem sie es verdichten. Bei einem Axialverdichter durchströmt das Arbeitsmedium die Maschine in Richtung der sich drehenden Welle, auf der in einer oder mehreren Stufen die Schaufeln des Laufrades angeordnet sind, die das Medium beschleunigen. Stillstehende Schaufeln am Gehäuse bilden das Leitrad, dessen Schaufeln die Strömung günstig auf das Laufrad lenken sollen. Solche Verdichter werden zum Betrieb von Gasturbinen (z. B. in Kraftwerken aber auch in Turbinenstrahlantrieben für Flugzeuge) eingesetzt, um das Gas auf den benötigten Eingangszustand zu bringen. Je höher Druck und Temperatur des Arbeitsmediums am Eingang einer Gasturbine sind, desto besser ist ihr Wirkungsgrad. Je höher also die Ansprüche an die Effektivität der Turbine sind, desto mehr ist auch der Verdichter gefragt. So müssen moderne Verdichter beispielsweise auch Durchströmungen über der Schallgeschwindigkeit bewältigen können. Daher werden bei der Auslegung von Verdichtern immer wieder neue Wege

57 Ernst Wilhelm Pfitzinger (1998): Kennfeldberechnung für Axialverdichter mit systematischer Untersuchung der Verlust und Umlenkeigenschaften von Schaufelgittern. Dissertation am Institut für Strömungsmaschinen der Universität Hannover. Alle Zitate des folgenden Abschnittes stammen aus dieser Veröffentlichung.

58 Im folgenden werden Rechnungen auf Gittern in drei Raumkoordinaten mit 3D und Rechnungen, die sich in einer Ebene bewegen, mit 2D gekennzeichnet.

59 Die Firma Sulzer Innotec gibt an, weltweit erstmalig das Strömungsfeld in einer kompletten Turbine mit einer 3D Navier Stokes Rechnung (stationär) ermittelt zu haben. Das Modell hatte 500 000 Knoten und 3 Mio Unbekannte. Die Rechenzeit betrug auf einer leistungsfähigen Workstation 100 Stunden. Die Ergebnisse wurden mit lasergestützten Messungen verifiziert. Vgl. Keck u. a. (1997, S. 29).

gesucht. An diesem Punkt setzt die Arbeit von Pfitzinger an. Speziell die Entwicklung optimierter Schaufelformen bezeichnet er als „aktuellen Forschungsgegenstand“ (S. 1). Seine Begründung für den Einsatz von CFD lautet folgendermaßen:

*„Derartige Optimierungsschritte erfordern ein sehr weitgehendes **Verständnis der zugrundeliegenden physikalischen Wirkungsmechanismen**. Den Forderungen nach Steigerung der Wirkungsgrade und Stufendruckverhältnisse sowie Verbesserung der Betriebssicherheit steht eine große Zahl von Einflußparametern und nicht zuletzt die hohe Komplexität der 3-dimensionalen, instationären Strömung gegenüber. Da der Entwicklungsstand moderner Turbomaschinen in den meisten Anwendungsbereichen bereits ein sehr hohes Niveau erreicht hat, wird ein Ausschöpfen des verbleibenden Verbesserungspotentials zunehmend schwieriger. Daher nehmen die unter dem Begriff CFD (Computational Fluid Dynamics) zusammengefaßten numerischen Simulationsverfahren eine zentrale Position bei der Auslegung von Turbomaschinen ein.“* (S. 1, Hervorhebung P.W.)

Pfitzinger beschreibt zunächst den Stand der Praxis für die Verdichterauslegung. Dabei fällt auf, daß die Auslegung nach wie vor auf der Basis traditioneller Vorgehensweisen betrieben wird.⁶⁰ Diese beruhen auf stark vereinfachten Ansätzen, wie z. B. der Betrachtung eines einzelnen „Stromfadens“ und vor allem auf einer Vielzahl empirischer Korrelationen, die in „jahrzehntelanger Erfahrung“ gewonnen wurden (S. 3). Der Einsatz realistischer numerischer Simulationen (instationäre 3D Rechnungen) des gesamten Strömungsfeldes ist nach Pfitzinger sowohl wegen der schwierigen Modellierung, als auch wegen der langen Rechenzeiten zu aufwendig für einen regulären Einsatz beim Verdichterentwurf. Numerische Rechnungen werden in der Industrie daher nur für spezielle Aspekte durchgeführt. Oft werden die Ergebnisse aus den Simulationsrechnungen zur Verbesserung der traditionellen Verfahren genutzt. Weiterhin dienen numerische Rechnungen zum Vergleich verschiedener Konstruktionsvarianten. Dabei werden qualitative Aussagen über die Veränderungen, aber keine exakten Absolutwerte als Ergebnis erwartet. Speziell bei sicherheitsrelevanten Untersuchungen verläßt man sich nicht auf die Numerik:

„Eine Bestimmung der für den Verdichterbetrieb äußerst wichtigen Stabilitätsgrenze geschieht aufgrund der Komplexität der Wirkungsmechanismen in der Regel auf der Basis empirischer Modelle.“ (S. 6)

Pfitzinger zitiert einen Fachtext, in dem 3D Simulationsverfahren als „numerische Windkanäle“ bezeichnet werden, die wohl zur Überprüfung der Auslegung eingesetzt, nicht aber für primäre Entwurfsaufgaben „verschwendet“ werden sollten (S. 7). Üblich sind dagegen sogenannte „zweidimensionale Meridianströmungsrechnungen“, bei denen die Strömungsverhältnisse nur in einzelnen Ebenen berechnet werden. Dreidimensionale Effekte werden dabei durch empirische Modelle einbezogen. Dieses Vorgehen bedarf jedoch nach Pfitzinger der Verbesserung. Das Problem sieht er dabei weniger in den physikalischen Vereinfachungen sondern vielmehr in der Qualität der empirischen Modelle und der experimentellen Daten, mit denen diese Modelle gebildet werden. Besonders die Bestimmung der „Schaufelcharakteristiken“ für neuartige Profile aus experimentellen Untersuchungen wirft große Schwierigkeiten auf.⁶¹ Eine Motivation der Industrie für die Verbesserung der Entwurfsverfahren ist dabei,

⁶⁰ Dies sind vor allem die in den 1950er Jahren entwickelten „2D Through Flow Verfahren“.

neben der Optimierung der Produkte, die Bestrebung, den Optimierungsprozeß zu automatisieren. Pfitzinger selbst steht solchen Versuchen zwar eher skeptisch gegenüber, weist aber darauf hin, daß die Verfahren für eine solche automatische Auslegung von Verdichtern besonders stabil und zuverlässig sein müssen, da die Erfahrung des Entwicklungsingenieurs als Kontrollinstanz nicht mehr wirken kann (S. 10).

Pfitzinger möchte nun die traditionellen Verfahren verbessern, indem er andere empirische Modelle für einzelne Effekte (z. B. radialer Austausch und Spaltströmung) in ein bereits bestehendes FEM-Programm zur Meridianströmungsrechnung einbaut. Die neuen empirischen Modelle entnimmt er der Literatur. Seine Auswahl begründet er jeweils mit physikalischer Plausibilität und mit Vorteilen bei dem Einbau in seine Modellstruktur. Um die neuen Modelle in das FEM-Programm integrieren zu können, muß dieses erheblich umgebaut werden. Das modifizierte Berechnungsprogramm wird an einem bekannten Strömungsfeld verifiziert.

Als weiteren Schritt zur Verbesserung der Verdichterauslegung entwickelt Pfitzinger ein Verfahren, um mit FEM-Rechnungen für einzelne Schaufelprofile Charakteristiken zu ermitteln. Damit würden die früher durchgeführten langwierigen Windkanalversuche an einzelnen Profilen durch numerische Experimente ersetzt. Die Ergebnisse dieser Rechnungen müssen jedoch aufwendigen Transformationen unterzogen werden, damit sie in den klassischen Entwurfsvorgang einbezogen werden können.⁶² Davon verspricht sich Pfitzinger neben einer Kostenersparnis eine Verbesserung der Auslegung, da anstelle der Verwendung allgemeiner Korrelationen die speziellen Eigenschaften einzelner Schaufelfamilien berücksichtigt werden können. Das Verfahren wird an einer bestimmten Profildfamilie erfolgreich überprüft.

Folgende Beobachtungen für die Rolle von FEM bei der Produktion von „Verdichtungswissen“ lassen sich festhalten:

Die von Pfitzinger bearbeitete Auslegung von Strömungsmaschinen ist viel stärker als die bisherigen Problemstellungen in eine sehr umfangreiche Tradition von Forschung und Praxis eingebunden, deren Komplexität diese Abhandlung nicht gerecht werden kann. Dennoch können Beobachtungen über die Wirkungsweise der FEM festgehalten werden, die ähnliche Züge wie die Schlüsse aus den vorherigen Anwendungsbeispielen zeigen. Offensichtlich ist es, daß mit der FEM keineswegs das Alte schlagartig ersetzt wird. Die CFD-Rechnungen basieren vielmehr auf sehr frühen traditionellen Ansätzen der Strömungsrechnung. Weiterhin operiert die FEM nicht als bloße „Vollstreckerin“ naturwissenschaftlicher Grundlagentheorie, sondern verbindet eine große Anzahl heterogener Techniken der Wissensproduktion. Die vielen experimentell ermittelten Ergebnisse, vor allem die empirischen Modelle für einzelne Effekte, verlieren nichts von ihrer Wichtigkeit für die Auslegung. Qualitative Überlegungen über die Vorgänge in der konkreten Maschine sind für den Bau von Strömungsmaschinen nach wie vor elementar wichtig. Das aufgestellte Ziel eines besseren „Verstehens“ der

61 Eine spezielle Arbeitsgruppe hat die verschiedenen in den USA der UdSSR und England durchgeführten Windkanal-Versuche mit unterschiedlichen Schaufelprofilen aufgelistet und systematisiert. Dabei ergeben sich zahlreiche Interpretationsprobleme wegen lokaler Besonderheiten, die einen Vergleich erschweren. Gleichzeitig ist es notwendig, die Besonderheiten spezieller Profile grob zu vereinfachen um allgemeingültige Korrelationen zu finden (S. 15).

62 Im Prinzip müssen die numerischen Ergebnisse auf die Form der alten empirischen Korrelationen gebracht werden!

„physikalischen Wirkmechanismen“ wird nicht auf einer rein mathematisch analytischen Basis sondern mit Hilfe eines komplex verwobenen Netzes von Wissenstechniken eingelöst.

Dennoch entsteht gerade durch die Zusammenbindung dieser vielen Einzelansätze in der einheitlichen Struktur eines FEM-Modells eine neue Dynamik in der weiteren Produktion technologisch verwertbaren Wissens. Durch die Möglichkeit, die Folgen unterschiedlicher Theoriekonstrukte für die Vorhersage im konkreten Fall sofort auswerten zu können, werden diese in ganz neuem Maße miteinander vergleichbar. FEM bildet somit eine Brücke zwischen unterschiedlichen Formen der Erkenntnis, indem sie deren Ergebnisse aufeinander abbildbar macht. Diese Funktion erweist sich – zumindest für die technikwissenschaftliche Praxis – als weit wichtiger als diejenige eines eigenständigen Erkenntnisinstrumentes. Dies zeigt vor allem der Ansatz von Pfitzingers zu einer neuen empirischen Anreicherung des FEM-Modells deutlich. Viel mehr als die womöglich exakte Lösung physikalischer Ansätze, die – soll sie praxistauglich sein – einen ähnlich hohen Aufwand wie das reale Experiment mit sich bringt, erlaubt das Paket aus empirischen und rechnerischen Methoden die von Pfitzinger angestrebte letzte Ausreizung der Möglichkeiten im Verdichterbau. Das primäre Interesse an CFD-Rechnungen besteht offensichtlich in der schnellen Ermittlung von Aussagen über die prinzipielle Richtung des Strömungsverhaltens der untersuchten technischen Konstellationen, um etwa die Auswirkung unterschiedlicher Konstruktionsvarianten auf das Strömungsverhalten abschätzen zu können. Die Lieferung exakter Werte für eine bestimmte Konstellation ist demgegenüber mit Methoden der Computersimulation äußerst schwierig und wird bleibt häufig den klassischen experimentellen Methoden überlassen.

Gesondert zu bewerten sind allerdings Pfitzingers numerische Experimente zur Ermittlung von Schaufelcharakteristiken. Zwar sind solche FEM-Rechnungen nicht zu denken, ohne daß das gesamte Modell zuvor an experimentell ermittelten Schaufelcharakteristiken verifiziert wird. Nach einer solchen Validierung operiert das Modell jedoch weitgehend eigenständig. Der wesentliche Vorteil ist hier jedoch – ähnlich wie bei der Kerbformanalyse für den Bajonettverschluß – eine rasante Beschleunigung und Verbilligung der Ergebnisproduktion und nicht primär eine qualitative Verbesserung der Ergebnisse gegenüber dem klassischen Laborexperiment. Damit wird die Entwicklung von technologischen Spezialzüchtungen, die mit klassischen Experimentierv Verfahren zwar möglich aber ungeheuer kostenträchtig wäre, erst rentabel. Die aus Zeit- und Kostengründen von klassischen Methoden vorgenommenen Verallgemeinerungen werden aufgrund der vereinfachten Durchführung von Berechnungen zunehmend in Spezialansätze aufgelöst.

3.4.9.4 Das Stabziehen⁶³

Das Stabziehen ist ein Umformverfahren für metallische Werkstoffe. In einer speziellen Vorrichtung (Ziehbank) werden Stahl-Stangen mit großer Kraft durch ein ringförmiges Werkzeug (Ziehring) gezogen, um sie auf einen bestimmten Durchmesser zu bringen. Durch die dabei eintretende „Kaltverfestigung“ entstehen hohe Oberflächen-

63 Christoph Ries (1996): „Experimentelle Untersuchungen und Finite-Elemente Simulation zur Temperaturverteilung im Werkzeug beim Stabziehen.“ Dissertation an der Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenbau (Institut für Werkstoffumformung) der TU Clausthal. Alle Zitate des folgenden Abschnittes stammen aus dieser Veröffentlichung.

güten. Die Umformung geschieht zwar bei Raumtemperatur („Kaltziehen“), wegen der Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück und der hohen Umformungsenergie entsteht jedoch eine große Menge Wärme. Von der Kontrolle dieser Wärmeentwicklung hängt es nun ab, wie schnell das Ziehen vor sich geht und wie lange das Werkzeug eingesetzt werden kann, bevor es unbrauchbar wird. Außerdem hat die Temperatur von Werkstück und Werkzeug wesentlichen Einfluß auf die Güte der gezogenen Stangen. Um konkurrenzfähig (z. B. gegenüber anderen Umformverfahren aber auch gegenüber Kunststoffprodukten) Ziehen zu können, muß daher, laut Ries, die Zieh-Temperatur effektiv gesteuert werden (vgl. S. 3). Ziel seiner Dissertation ist es aus diesen Gründen, mit der FEM elementare Zusammenhänge zwischen den Prozeßführungsgrößen, der Temperatur und dem Ausgangszustand von Werkzeug und Werkstück zu ermitteln. Ries schreibt in seiner Einleitung:

*„Diese Faktoren zwingen dazu, reproduzierbar hohe Produktqualitäten flexibel und kostengünstig bei immer kürzer werdenden Auftragsdurchlaufzeiten herzustellen. Aus den angeführten Gründen ist es daher wichtig, **genaue Kenntnisse von den Vorgängen beim Umformprozeß** zu besitzen. Da der reale Prozeß durch analytische Methoden nur mit starken Vereinfachungen oder sehr schwer berechenbar ist, wird verstärkt die Finite Elemente Methode (FEM) zur Simulation und Optimierung bei der Werkzeug- und Prozeßgestaltung eingesetzt.“* (S. 3)

Im Unterschied zu den bisher geschilderten Anwendungen der FEM geht es hier um die Optimierung eines Fertigungsprozesses und nicht um die Optimierung der Struktur eines Artefaktes. Wie auch schon bei der Windkanalwaage spielt neben der Bestimmung mechanischer Größen die Berechnung von Temperaturverteilungen eine Rolle. Für die Wärmelehre, die traditionell innerhalb der Technikwissenschaft für solche Problemstellungen zuständig ist, gilt Ähnliches wie für die Strömungsmechanik. Zwar gibt es allgemeine Gleichungen, die den Transport von Wärme über Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung beschreiben. Lösungen für diese Gleichungen existieren jedoch nur für sehr einfache Spezialfälle. Reale Temperaturverteilungen in Bauteilen mit einigermaßen komplexer Geometrie lassen sich nicht daraus berechnen. Daher wurden praxisrelevante Fälle von Wärmeübertragung (etwa in Rohren von Wärmetauschern) in der Vergangenheit durch Zurückführung auf einfache lösbare Fälle behandelt. Ähnlich wie in der Strömungslehre wurden diese einfachen theoretischen Ansätze durch eine große Fülle empirischer Ergänzungen verbessert. Mithilfe der FEM ist es nun möglich, die Differentialgleichungen der Wärmeübertragung auch für realistische Fälle auszuwerten. Solche thermischen Analysen sind neben den strukturmechanischen Berechnungen ein Schwerpunkt der FEM-Anwendungen.

Bei der Modellierung des Stabziehens besteht allerdings die Schwierigkeit, daß thermische und mechanische Effekte gekoppelt betrachtet werden müssen. Einerseits entsteht nämlich aus den Verformungen Wärme, andererseits werden aber durch die großen Temperaturunterschiede Spannungen verursacht. Ries resümiert in seiner Arbeit zunächst die bisherigen Versuche zur analytischen Behandlung dieser Problematik. Dabei zeigt es sich, daß lange Zeit lediglich auf sehr einfachen, schon 1945 entwickelten Ansätzen für eine Wärmebilanz am Ziehstab aufgesetzt wurde. Zur Berechnung von Spannung und Formänderung existieren traditionelle Näherungsverfahren, die Aussagen über lokale Größen möglich machten, ohne an die entsprechenden naturwissenschaftlichen Erkenntnisse (die elementare Plastizitätstheorie)

anzuknüpfen. 1988 wurden erste Versuche mit numerischen Rechnungen unternommen. Allerdings ist es – laut Ries – sehr schwierig, die FEM-Modelle durch Messungen zu verifizieren, da in der Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück während des Ziehens keine Sensoren untergebracht werden könnten. Daher existiere eine Vielzahl rein theoretischer numerischer Modelle ohne praktische Bedeutung. Um demgegenüber praxisrelevante Simulationsergebnisse erzielen zu können, hat Ries folgendes Vorgehen eingeschlagen:

Zunächst wird ein Verfahren entwickelt, das es erlaubt, aus Messungen der Temperatur an einzelnen Stellen im Ziehring über Rechnungen an einem FE-Modell das komplette Temperaturfeld herzuleiten.⁶⁴ Mit diesem Modell ist es möglich, reale Experimente so auszuwerten, daß Zusammenhänge zwischen Verfahrensparametern wie Ziehgeschwindigkeit oder Werkstoffpaarung und Temperaturfeld ermittelt werden können. Um darüber hinaus Parameter zu untersuchen, die nicht so einfach im realen Experiment variiert werden können, wird ein thermisch-mechanisches FEM-Modell von Stab und Werkzeug entwickelt. Mit diesem Modell sollen aus der Angabe der Randbedingungen und der Stoffwerte die Temperaturverteilungen in Stab und Ring sowie alle auftretenden Kräfte und Umformungen berechnet werden können. Damit könnte das Stabziehen in „numerischen Experimenten“ untersucht werden. Ein Vergleich mit „echten“ Meßwerten ist über das erste Modell möglich. Als problematisch erweisen sich allerdings die sehr langen Rechenzeiten (bis zu 160 Stunden auf einer leistungsfähigen Workstation).

Einen kleinen Eindruck von der Fülle der qualitativen Überlegungen und praxisgeleiteten Annahmen, die bei der Entwicklung eines solchen FEM-Modelles involviert sind, gibt folgender Abschnitt:

„Die dem realen Werkzeug entsprechende Lagerung wurde durch das Verhindern von Verschiebungen bestimmter Werkzeugkanten simuliert. Um die Krafteinleitung auf den Stab durch den Ziehwagen nachzuahmen, wurden die Knoten an der Stirnseite des Stabes mit einer konstanten Verschiebung in Ziehrichtung pro Inkrement beaufschlagt. Der Wärmeübergang zwischen Stab und Düse wurde durch den Wärmeübergangskoeffizienten gesteuert, der als konstant angenommen wurde. Für die Modellierung der Reibung wurde das Coulombsche Reibgesetz verwendet. Die Reibzahl μ wurde in Abhängigkeit der Ortskoordinate und Ziehgeschwindigkeit definiert. Der Anteil der plastischen Verformungsenergie, der in Wärme umgewandelt wird, wurde auf 85% festgelegt“ (S. 37)

Und etwas weiter:

„Gegenüber dem realen Ziehprozeß wurde weiterhin der Einfluß folgender Parameter vernachlässigt: Wärmeübertragung von Stab und Werkzeug an die Umgebung infolge Wärmestrahlung und Konvektion, geometrische Formabweichungen von kreisrunden Querschnitt, Anisotropie und Textur“ (S. 38)

Zahlreiche Stoffkennwerte müssen für die simulierten Materialien aus Herstellerangaben entnommen oder in eigenen Versuchen erst aufwendig ermittelt werden. Wichtige Parameter werden in iterativer Anpassung zwischen FEM-Rechnungen und Versuchen festgelegt. Ein Beispiel dafür ist der Verlauf der Reibzahl beim Ziehen, deren Kennt-

⁶⁴ Diese Messungen sind sehr aufwendig. Sechzehn Bohrungen in dem Ziehring dienten zur Aufnahme von Thermoelementen. Ziehkraft und Ziehgeschwindigkeit wurden über eigenen Meßeinrichtungen erfaßt.

nis nötig ist, wenn das Coulombsche Reibgesetz angewendet werden soll. Hier müssen qualitative Überlegungen darüber angestellt werden, wovon die Reibverhältnisse überhaupt abhängen. Bisher existieren keine Modellvorstellungen über diese sehr komplizierten Zusammenhänge. Die numerischen Versuche geben hier teilweise Hinweise. So war es z. B. mit einer über die Ziehlänge konstanten Reibzahl nicht möglich, zufriedenstellende Übereinstimmung zu erzielen. Daraus konnte gefolgert werden, daß die Reibverhältnisse von der Kontaktnormalspannung abhängen. Ursache dafür könnte die Abhängigkeit zwischen Schmierung und Reibung sein.

Aus den im Verlauf der Modellierung gewonnenen Erkenntnissen und aus den Ergebnissen der numerischen Experimente, die mit dem FEM-Modell durchgeführt wurden, leitet Ries einige Regeln für den Prozeß des Stabziehens ab:

„Aus den vorgestellten Ergebnissen lassen sich folgende Richtlinien ableiten, bei deren Beachtung die Temperaturen im Ziehwerkzeug (und Ziehgut) reduziert werden können:

Mit möglichst geringer Geschwindigkeit ziehen [...].

Die Reibungsbedingungen sollten minimiert werden.

Der Kernwerkstoff sollte sowohl eine hohe Wärmekapazität als auch eine hohe Wärmeleitfähigkeit besitzen [...].“ (S. 55)

Allerdings treten auch hier, wie schon bei der Windkanalwaage, die Grenzen einer eindimensionalen Optimierung zu Tage. So konstatiert Ries am Ende seiner Verbesserungsvorschläge:

„Diese Maßnahmen zielen nur auf eine Verringerung der entstehenden Temperaturen ab. Spannungen und Kräfte im Ziehwerkzeug und im Ziehgut können davon unter Umständen negativ beeinflusst werden.“ (S. 55)

Dieses Ergebnis der FEM-Untersuchung des Stabziehens erscheint auf den ersten Blick recht dürftig. In der Allgemeinheit der von Ries abgeleiteten Verfahrensregeln ist nicht mehr viel von dem Anspruch einer detailgetreuen Realitätsabbildung durch Computersimulation zu spüren. Das Versprechen, die allgemeinen Verfahrensregeln, die schon die herkömmlichen Verfahren lieferten, durch die Bereitstellung exakter und spezifischer Größen zu ersetzen, bleibt weitgehend uneingelöst. Ein realitätsgetreuer Nachvollzug selbst eines auf den ersten Blick recht einfachen Verfahrens wie dem Stabziehen bleibt in weiter Ferne. Dies ist besonders angesichts der hohen experimentellen, theoretischen und programmiertechnischen Aufwendungen, die zu der Modellierung notwendig waren, zunächst erstaunlich. Betrachtet man jedoch den Ertrag der Arbeit von Ries genauer, so zeigt es sich, daß die FEM-Rechnungen weniger als eine Methode zur exakten Abbildung der Verhältnisse sondern eher als ein Hilfsmittel bei der Bildung funktionierender Modellvorstellungen eingesetzt sind. Ganz ähnlich wie im Falle der Windkanalwaage und des Bajonettverschlusses, hilft die FEM dabei, qualitative Modellvorstellungen über die Abläufe im Inneren der Bauteile zu entwickeln. So kann z. B. der Einfluß von Faktoren auf das Rechenergebnis bestimmt werden, so daß über mögliche Vernachlässigungen entschieden werden kann. Diese Erkenntnisse fallen im Verlauf der Modellierung ab und liefern wertvolle Hilfen bei dem Umgang mit dem Prozeß. Zwar wird es auch in Zukunft nicht möglich sein, Prozesse wie das Stabziehen realistisch für einzelne konkrete Fälle auf dem Computer zu simulieren, um z. B. auf der Basis solcher Simulationen alle wesentli-

chen Einstellungen vorzunehmen. Dennoch war es durch die Anwendung von FEM möglich, innerhalb einer recht kurzen Zeit eine effektivere Umgangsweise mit dem Prozeß zu entwickeln. Die zuvor auf klassischem Wege erreichte Verbesserung des Stabziehens dagegen hatte eine jahrzehntelange Ansammlung von Erfahrungswerten benötigt.

Im übrigen ist es zu erwarten, daß es bei der eher lapidaren Auswertung der numerischen Experimente von Ries nicht bleiben wird. Ähnlich wie bei dem Axialverdichter, wird über immer weitere Modifikationen des FEM-Modells eine immer dichtere wechselseitige Anpassung zwischen dem Modell und dem modellierten Prozeß stattfinden. So ist jetzt schon zu erkennen, daß das von Ries entwickelte Modell zur Umrechnung weniger Meßwerte in das komplette Temperaturfeld im Ziehring ein wirkungsvolles Übersetzungsinstrument zwischen Laborversuch, numerischem Versuch und Theorie darstellt. Ebenso wie bei der Entwicklung von Strömungsmaschinen ist daher bei der Technik des Stabziehens und bei jeder Technologie, in der sich einmal funktionierende Kombinationen von Modell, Experiment und technologischem Verfahren etabliert haben, eine Beschleunigung der Entwicklung zu erwarten. Allerdings hat gerade die Modellierung des Stabziehens gezeigt, welche enormen Zurichtungsleistungen notwendig sind, um relevante Bereiche der Wirklichkeit aus der Komplexität ihrer Zusammenhänge zu dekontextualisieren und in die formale Struktur des numerischen Labors zu transferieren und wie klein die Bereiche sind, für die wirklich praktisch relevante Aussagen aus solchen formalen Strukturen gewonnen werden können.

3.4.10 Neue Brücken statt alter Krücken? Das FEM-Modell als epistemologischer Hybrid und autonomes Instrument

Zunächst kann festgehalten werden, daß sich in allen diskutierten Beispielen die in Abschnitt 3.4.3 besprochenen Übersetzungsschritte der FEM-Modellierung in der ein oder anderen Form wiederfinden. Alle vier Anwendungen zeugen dabei von den vielen Schwierigkeiten, die auftreten, wenn – jenseits von Lehrbuchbeispielen – real existierende Vorgänge in ein FEM-Modell übersetzt werden sollen. Die konkreten Dinge und die lokalen Verhältnisse erweisen sich gegenüber universalisierenden Zugriffen in vielerlei Hinsicht als widerspenstig. Eine Fülle aufwendiger Zurichtungen ist nötig, um auch nur für wenige Fälle gültige Modelle zu konstruieren. Auch das engmaschigste Gitter kann die Vielfalt und Komplexität von Materialität nicht ohne weiteres einfangen. Bevor ein FEM-Modell überhaupt funktionierendes Wissen produzieren kann, müssen mühselige Anpassungsvorgänge stattfinden. Unterschiedliche Wissensanteile müssen konsistent formuliert werden, Kennwerte realer Stoffe und Strukturen werden in aufwendigen Vorversuchen ermittelt. Empirische Modelle und klassische Modellvorstellungen werden herangezogen und für das FEM-Modell bearbeitet. Mit erheblichem Aufwand werden Computerprogramme erstellt oder angepaßt, da die Anwendungen über die standardisierten Möglichkeiten kommerzieller Software weit hinausgehen. Als äußerst schwierig erweist sich oft der Abgleich zwischen Laborexperiment und Simulationsexperiment: Modernste Meßtechnik muß aufgeboten werden, um simulierbare Größen zu meßbaren Größen zu machen. Zwar wird in allen vorgestellten FEM-Anwendungen die Motivation laut, funktionale, kausale Zusammenhänge in den behandelten Weltausschnitten aufzuspüren und damit alte Verfahren der Technologieauslegung, die lediglich die störungsfreie Handhabung bestimmter

Artefakte absicherten, durch zielgenaue Regeln zu deren Bearbeitung zu ersetzen. Dieses Ziel wird jedoch, wenn überhaupt, auf eine andere Weise als durch die postulierte Deduktion aus Grundlagentheorie erreicht. Der immer wieder geäußerte Wunsch nach einem besseren Verständnis der inneren Vorgänge in den behandelten materiellen Strukturen wird nicht direkt über die FEM-Analyse eingelöst. So zeigte es sich z. B. bei Anwendungen wie der Windkanalwaage oder dem Bajonettverschluß, daß mit einer FEM-Rechnung noch nicht viel gewonnen ist, da diese zwar die Beanspruchungen eines Bauteils, aber keine Information darüber, wovon diese womöglich abhängen, liefert. Das tragende Instrument bei der Entwicklung funktionaler Zusammenhänge sind in allen hier besprochenen Beispielen nach wie vor die klassischen halb empirisch, halb analytisch fundierten Modellvorstellungen. Allerdings hat die FEM zu der Schärfung und Auswahl solcher Modellvorstellungen Einiges beizutragen. Sie ermöglicht die schnelle Übersetzung zwischen theoretischen Ansätzen und konkreten experimentell nachvollziehbaren Szenarios. Durch die im Verlauf der FEM-Modellierung auftretende Notwendigkeit, ganz unterschiedliche Wissensanteile konsistent zu formulieren, wird es nötig, die behandelten Teile von Welt auf eine für die Modellierung passende Weise neu zu konzeptualisieren.⁶⁵ Die Wirkungsmacht der FEM beruht im wesentlichen auf diesen im Verlauf der Modellierung erarbeiteten Brückenschlägen zwischen verschiedenen Formen menschlicher Analyse von Welt.⁶⁶ Sowohl die alten Berechnungsmodelle als auch die Erfahrungsregeln behalten in den meisten Fällen ihren Wert und werden nur effektiver verknüpft. Es läßt sich beobachten, daß gerade dann besonders viele lokal verwurzelte, empirische Wissensanteile in ein FEM-Modell eingebracht werden müssen, wenn spezifische und konkret in technologische Handlungsanweisungen übersetzbare Aussagen von dem Modell erwartet werden. Es zeigt sich damit, daß sich eine Methode wie die FEM als effektives Hilfsmittel in den klassischen Zyklus technikwissenschaftlicher Untersuchungen – dem iterativen Abgleich zwischen Theorie, die mit diversen empirisch verwurzelten Modellvorstellungen durchsetzt ist, auf der einen und dem Experiment auf der anderen Seite – integrieren läßt. Dabei ist das klassische Experiment keineswegs einfach durch das numerische Experiment zu ersetzen. Reale Laborversuche sind bei der FEM-Modellierung zur Verifizierung der Modelle, aber auch für die Ermittlung wesentlicher Modellparameter, unverzichtbar. Ohne diese Verklammerung mit den klassischen Methoden der Laborwissenschaften zur Konstruktion stabilen Manipulationswissens zerfällt das ganze Konstrukt numerischer Weltabbildung zu einer leeren Formel.

Entgegen der ursprünglich geäußerten Vermutung und auch entgegen der in vielen Veröffentlichungen durchscheinenden Einschätzung, daß Methoden wie FEM einseitig die naturwissenschaftlich angeleitete, deduktive Vorgehensweise der Wissensproduktion vorantreiben oder diese erst vollenden, ist es nun offensichtlich, daß

65 Morrison und Morgan (1999) haben darauf hingewiesen, daß Modellierung aus diesem Grund immer einen Lernprozeß über die behandelten Weltausschnitte beinhaltet: „It is this process of interpreting, conceptualising and integrating that goes on in model development which involves learning about the problem at hand“ (S. 31).

66 Eine solche These ließe sich wahrscheinlich auch im Hinblick auf den Einsatz von numerischen Verfahren in den Naturwissenschaften aufstellen. Ein wesentlicher Aspekt liegt hier in der Abbildungsmöglichkeit verschiedener Wissenssysteme aufeinander. So z. B. Trottenberg (1999, S. 8): „Ein Charakteristikum des wissenschaftlichen Rechnens ist, daß ganz verschiedene Gebiete wie die Meteorologie, das Flugzeug- oder Fahrzeugdesign, die Chemie neuer pharmazeutischer Wirkstoffe, die Erdbebenvorhersage und die Astrophysik durch eine methodische Klammer verbunden sind [...]“.

vollkommen unterschiedliche Techniken der Erzeugung von Wissen über Welt unter dem Dach der FEM vereint sind. Das für technologische Zwecke auswertbare FEM-Modell ist um Vieles mehr als nur ein Verbund angewandter naturwissenschaftlicher Grundlagentheorie. FEM-Modelle haben somit wenig Ähnlichkeit mit den „Modellen der Theorie“ wie sie in der semantischen Auffassung von naturwissenschaftlicher Weltbeschreibung auftauchen. Die naturwissenschaftliche Theorie liefert zwar wesentliche Modell-Bausteine und dient vor allem auch zu einer Systematisierung von Modellen nach ihrer theoretischen Orientierung. Zu Modellen, die tatsächlich konkrete Phänomene beschreiben können, werden diese formalen Strukturen jedoch erst, wenn die vielen anderen Modellanteile hinzukommen. Die FEM erweist sich somit als eine Art „epistemologischer Hybrid“. Gerade die doppelte Verankerung von FEM-Modellen in Welt und Theorie macht ihre große Wirkmächtigkeit aus. Erst diese mühselige Flickschusterei vieler kleiner Teilstücke verleiht dem FEM-Modell letzten Endes die von Morrison (1999) für Modellierungen von Welt aufgezeigte Funktion eines autonomen Instrumentes im Prozeß der Wissensgenerierung.⁶⁷ Der Einsatz von FEM-Modellen als „Vermittler zwischen Technologie, Theorie und Phänomenen“⁶⁸ kann daher nicht ohne die vielschichtigen Einschreibungen und Übersetzungen verstanden werden, die nötig sind, um die einzelnen Elemente zusammenzubringen.

3.4.11 Analytisch basierte Computersimulation als Finalisierung?

Im Zusammenhang mit dem Ergebnis über die epistemologische Hybridität der FEM kann auch eine weitere im Vorfeld geäußerte Vermutung modifiziert werden. So wurde bei der Diskussion der Finalisierungstheorie als Hintergrund für die Interpretation von Computersimulation in Abschnitt 1.4.3 die These aufgebracht, daß sich die Bildung von Objektklassen, für die von den Technikwissenschaften aus der Grundlagentheorie funktionierende Anwendungsaussagen abgeleitet werden, mit den Möglichkeiten der Computersimulation erübrige, da nun direkt jeder Einzelfall aus der Grundlagentheorie abgeleitet werden könne. Diese These wird jedoch von den Fallbeispielen klar widerlegt. Sowohl die empirischen Modelle als auch die experimentellen Ermittlungen von Modellparametern erfordern nach wie vor eine Klassenbildung. So gelten die Ergebnisse von Pfitzingers Strömungsuntersuchungen nur für ganz bestimmte Schaufelfamilien. Der Deckel mit Bajonettverschluß kann ab einer bestimmten Dicke nicht mehr mit dem FEM-Modell berechnet werden, weil die getroffenen Annahmen ihre Gültigkeit verlieren, und die Ergebnisse der Stabziehanalyse gelten nur für einen ganz bestimmten Geschwindigkeitsbereich. Überdies wurde im vorigen Abschnitt konstatiert, daß die auf bestimmte Objektklassen gerichteten „Anwendungsgrundlagentheorien“, die laut Finalisierungstheorie zwischen naturwissenschaftlicher Grundlagentheorie und technologischer Anwendung vermitteln, auch in der FEM-Modellierung eine wichtige Rolle spielen. Darüber hinaus könnte auch ein kompletter Satz von Komponenten, wie sie für eine FEM-Simulation in einem technischen Bereich nötig ist (geeignete Grundlagentheorie, numerische Lösungsansätze, Rechengitter, experimentelles Setting zur Validierung), als simulationsspezifische Anwendungsgrundlagentheorie interpretiert werden. Ebenso wie die von der Starnberger Forschungsgruppe beschriebenen Beispiele klassischer Finalisierung vermittelt ein solcher Satz von theoretischen und praktischen Elementen einer FEM-

⁶⁷ Vgl. Abschnitt 1.3.3.

⁶⁸ Morrison 1998, S. 70.

Simulation zwischen Fundamentaltheorie und Gegenstandsbezug. Für welche Art von Gegenständen solche funktionierenden Passungen von Wissenstechniken entwickelt werden, ist jedoch von gesellschaftlichen Entscheidungen abhängig. Damit behalten auch die Aussagen der Finalisierungstheoretiker über die soziale Steuerung der Auswertung von Grundlagentheorie über die Klassenbildung schon in einer sehr frühen Phase wissenschaftlicher Forschung volle Gültigkeit. Dies gilt umso mehr, als daß gerade die Durchführung von Forschungen zum Zwecke der Klassenbildung für Computersimulation sehr kostenintensiv ist.⁶⁹ Dennoch ist es klar, daß sich die Vermittlungspraxis zwischen Theorie und Anwendung mit Computersimulation einschneidend verändert. Hinsichtlich der Art und Weise der Nutzbarmachung von Grundlagentheorie für technische Anwendungszwecke kann jedoch kein prinzipieller qualitativer Unterschied zwischen herkömmlicher Finalisierung und der systematischen Anwendung von Computersimulationen ausgemacht werden. Die Erklärung für die ausgerufene „Revolution“⁷⁰ in der Technikentwicklung muß daher anderweitig gesucht werden.

3.4.12 Näher an die Realität mit Computersimulation?

FEM-Simulation schlägt Brücken zwischen theoretischen Grundlagen und konkreten Strukturen in der Welt. Sie macht es möglich, zahlreiche naturwissenschaftlich hergeleitete Gleichungen für konkrete technische Systeme auszuwerten. Auf viele Vernachlässigungen und Vereinfachungen, die in klassischen Ansätzen zugunsten der Handhabbarkeit der Gleichungen getroffen werden mußten, kann dabei verzichtet werden. Diese Entwicklung wird häufig als eine fortschreitende Verbesserung der „Realitätsnähe“ naturwissenschaftlicher Weltbeschreibung interpretiert. So urteilt der Informatiker Friedeman Mattern (1995, S. 25):

„Simulationen mit Hochleistungsrechnern eröffnen jedenfalls die Chance, von den klassischen reduktionistischen Methoden der Naturwissenschaften abzurücken und mittels realitätsgetreuer holistischer Modelle, bei denen die zugrundeliegenden Naturgesetze nicht übersimplifiziert werden, das Zusammenspiel vieler Einzelkomponenten in ihrer Gesamtheit zu erfassen.“

Diese in ähnlicher Form häufig aufgebrachte These, Computersimulation führe zu einer größeren Annäherung naturwissenschaftlicher Weltbeschreibung an die komplexe Realität, kann anhand der erzielten Ergebnisse differenziert bewertet werden.

Die Gleichsetzung höherer Modellkomplexität mit größerer Realitätsnähe ist – zumindestens für die Technikwissenschaften – jedoch keineswegs selbstverständlich. Die Finalisierungstheorie hat gezeigt, daß es auch in vielen klassischen praktischen Anwendungen naturwissenschaftlicher Erkenntnisse nicht nur Vereinfachungen und Idealisierungen waren, die von der Theorie zur Anwendung führten. Vielmehr handelt es sich bei der Anwendungsgrundlagentheorie um zusätzliche eigenständige Konzepte, in denen für das Verhalten einer Klasse von Phänomenen eine Art qualitatives Verständnis entwickelt wird. Dieses Verständnis ist oft gerade aus einem intensiven

⁶⁹ Vgl. auch die Ausführungen in Kapitel 2 über die historische Entwicklung von Computersimulation. Hier war deutlich geworden, daß Computersimulationen nur mit Hilfe finanzieller Unterstützung verschiedener Institutionen für ausgewählte Bereiche (vor allem militärische Zwecke) zur Anwendungsreife gebracht werden konnte. Vor allem die Entwicklung der notwendigen Rechnertechnik wurde durch massive staatliche Förderung angeschoben.

⁷⁰ Vgl. z. B. Graves (1982): „Computational Fluid Dynamics – The Coming Revolution“ (Titel).

praktischen Umgang mit den Phänomenen gewachsen und spiegelt eine Fülle menschlicher Erfahrungen und Beobachtungen in einem Praxisfeld wieder. Auch Nancy Cartwright (1983) und Margaret Morrison (1999 und 1998) vertreten ebenso wie zahlreiche Forscherinnen und Forscher der auf die Wissenschaftspraxis gerichteten neueren Wissenschaftstheorie, die Auffassung, daß es gerade solche in der Praxis verwurzelten Ansätze sind, die zwar von der Grundlagentheorie weg, aber zu der Realität hinführen.⁷¹ Nach den obigen Ergebnissen über Computersimulation als neue Art der Finalisierung und als Sammelsurium verschiedener Wissenstechniken kann festgestellt werden, daß die Annäherung an komplexe Abläufe in der Wirklichkeit über Computersimulation zwar stattfindet, diese aber nicht primär auf der besseren Auswertung naturwissenschaftlicher Grundlagentheorie sondern auf einem Zusammenspiel unterschiedlichster Techniken der Wissensgenerierung beruht. Die Annäherung an die Realität muß darüber hinaus als wechselseitiger Anpassungsvorgang betrachtet werden. Denn wie es die Beispiele für die FEM-Anwendung deutlich gezeigt haben, sind es stets gezielt zugerichtete Ausschnitte von Wirklichkeit, die von den Gittern der FEM umspinnen werden. Für diese aufwendig in kleinen Bereichen hergestellten Passungen besteht dann allerdings oft tatsächlich eine Nähe zwischen formaler Beschreibbarkeit und realer Herstellbarkeit von Verhaltensweisen, wie sie von vorherigen Verfahren nicht erreicht werden konnte. In diesem Sinne eines effektiveren Zugriffs auf zugerichtete materielle Strukturen kann in der Tat von einer größeren Realitätsnähe gesprochen werden. Das ausschlaggebende Kriterium für die Konstruktion der Modelle für technisch motivierte Computersimulationen ist jedoch stets die operative Bewährung bei der Technologieentwicklung und nicht der Wunsch nach einer möglichst genauen Repräsentation eines Weltausschnittes in möglichst vielen seiner Facetten. Daher vollziehen auch die Modelle der Computersimulation eine technischen Rekonstruktion von Welt, bei der stets nur einige verwertbare Aspekte der behandelten Weltausschnitte aufgenommen und verarbeitet werden. Eine größere Nähe zur Realität etwa im Sinne einer in realen Kontexten vorgefundenen, unverarbeiteten materiellen Struktur kann somit keinesfalls postuliert werden. Dies gilt es vor allem dann zu bedenken, wenn die Ergebnisse der auf den Modellen beruhenden Simulationsrechnungen in Form von „natürlich“ anmutenden bunten Bildern präsentiert werden.

3.4.13 Zusammenfassung – Die FEM als Stabil-Mobil

Im Mittelpunkt der Untersuchung in diesem Kapitel stand mit der Methode der Finiten Elemente ein auf analytischer Modellierung beruhendes, weit verbreitetes und wirkmächtiges Verfahren der Computersimulation. Methoden wie die FEM strukturieren die Entwicklung von Technik in mehrfacher Hinsicht um. Zum Einen verändert sich die Organisation der Entwicklung technischer Artefakte in der industriellen Praxis. Zum Anderen ist aber auch die grundsätzliche Art und Weise der Verarbeitung von materiellen Strukturen in technischen Artefakten Umbrüchen unterworfen. Ziel der Untersuchung war es, diese Veränderungen genauer zu verstehen und in ihrer Bedeutung für die Bildung materieller Anteile sozialer Strukturen zu interpretieren. Dazu wurden in Abschnitt 3.4.1 zunächst die Ansprüche und Erwartungen geschildert, die sich in der Technikentwicklung mit dem Einsatz von FEM verbinden. In

⁷¹ Einen anderen Aspekt diskutiert Stephan Hartmann (1996). Er weist darauf hin, daß die Tendenz zur Modellverfeinerung häufig auf Kosten der Einfachheit und intuitiven Verständlichkeit der Modelle geht.

einer detaillierten Darstellung der einzelnen Schritte von FEM-Modellierungen wurde dann dargestellt, wie es auf „finiten Pfaden“ gelingt, Informationen über funktionierende Zusammenhänge in materiellen Strukturen zu gewinnen, die auf herkömmliche Weise nicht hätten produziert werden können. Dabei wurde aufgezeigt, daß es sich bei der Erstellung eines FEM-Modells um einen kontingenten Vorgang handelt, in dessen Verlauf zahlreiche pragmatische Entscheidungen getroffen werden müssen. Durch die notwendigen Übersetzungen von Zwecken und Vorstellungen in Grenzen und Strukturen von „finiten Modellen“ entstehen spezifische Verflechtungen sozialer, formaler und materieller Komponenten.

Der zu Beginn dieser Arbeit aufgebrachte Begriff des „Rekonfigurationsvorganges“, der von Karin Knorr-Cetina für die Umordnungen in den Laboren moderner Naturwissenschaft gebraucht wurde, läßt sich somit auf Modellierung im „FEM-Computerlabor“ gleich auf mehreren Ebenen anwenden läßt. Analog zum naturwissenschaftlichen Labor kann auch das Computerlabor als Produktionsstätte wirkmächtiger Wissenszusammenhänge aus dekontextualisierten Ausschnitten von Welt betrachtet werden.⁷² Im Anschluß an die Untersuchungen des ersten Teils, die sich auf die Funktion und Wirkungsweise der FEM konzentrierten, ging es in den darauffolgenden Ausführungen darum, das produzierte Wissen epistemologisch einzuordnen. Dabei stellte sich heraus, daß der entscheidende Effekt von FEM weniger eine prinzipielle Neuartigkeit des gewonnenen Wissens, als vielmehr der Brückenschlag zwischen unterschiedlichen Formen menschlicher Wissensgewinnung über Welt ist. Indem sie die Ergebnisse unterschiedlicher Formen von Wissensproduktion und Speicherung aufeinander abbildet, wird die FEM zu einem wirkmächtigen Scharnier zwischen verschiedenen Ressourcen technikwissenschaftlicher Wissensgenerierung. Während früher jahrzehntelanges Sammeln von Meßreihen und Entwicklung von Rechenverfahren zu einzelnen Theorie/Modell/Experiment Kombinationen notwendig war, um einen aussagekräftigen Vergleich zwischen theoretischen Berechnungen und experimentellen Daten zu ermöglichen, lassen sich mit der FEM in kurzer Zeit zahllose Varianten durchspielen. Damit tritt eine ungeheure Beschleunigung des klassischen Suchverfahrens nach funktionierenden Kombinationen zwischen Weltabbildungen und Welteingriffen ein. Parametervariationen, die in klassischen Laborexperimenten aufwendige Umbauten des Instrumentariums unter hohem Einsatz von technischem und wissenschaftlichen Personal erforderten, werden im Computerlabor durch wenige Tastatureingaben oder einen einfachen Mausklick erledigt. Im Idealfall können selbst diese Eingaben noch durch die Eingabe vorprogrammierter Algorithmen automatisiert werden. Ohne großen Aufwand an Zeit und Kosten können zahlreiche Variationen eines Simulationsexperimentes durchgeführt werden. Auf diese Weise ist es leicht möglich, die Auswahl der simulierten Szenarios schnell an veränderte Bedingungen, wie z. B. die Wünsche von Kunden anzupassen. Ferner können aus einem einzigen Experiment durch immer neue Formen der Datenanalyse viele verschiedene Aussagen gewonnen werden. Dabei können sofort nach der Berechnung zu jeder neuen Aussage Bilder mit verschiedenen Ansichten, Maßstäben und Informationsgehalten produziert und verbreitet werden. Der Weg von der Datenproduktion zu

⁷² Selbstverständlich ist dieser Vergleich nur in formaler Hinsicht berechtigt. Die konkreten Mechanismen der Neu- und Umdefinition von Aussagesystemen über Entitäten sind voneinander sehr verschieden. So spielen im wissenschaftlichen Labor Interaktionen zwischen Gruppen von Akteuren eine entscheidende Rolle.

der öffentlichkeitswirksamen Publikation wird dadurch extrem verkürzt. Solche Bilder lassen sich zudem unproblematisch nacharbeiten, ohne daß Spuren davon zu sehen sind. Alle produzierten Informationen können, da sie in digitaler Form vorliegen, direkt von anderen Computerprogrammen analysiert und graphisch aufgearbeitet werden. In Gitterform codierte Objekte können in Datenbanken gespeichert und in verschiedene Simulationsszenarien eingebunden werden. Gleiches gilt für Modelle oder Modellelemente. In kommerzieller Simulationssoftware sind ganze Pakete fertiger Simulationsbausteine enthalten, die miteinander kombiniert werden können. Mit Computersimulation ergeben sich ferner vollkommen neue Möglichkeiten des weltweiten Austauschs der Ergebnisse technikkwissenschaftlicher Forschung. Numerische Experimente lassen sich an jedem Ort beliebig oft wiederholen. Daher ist die persönliche Zeugenschaft, die innerhalb neuzeitlicher Naturwissenschaft stets ein wichtiges Kriterium für die Glaubwürdigkeit von Experimenten war⁷³, im numerischen Experiment immer wieder leicht produzierbar. So können beispielsweise Simulationen vor dem Kunden auf dessen Computern vorgeführt werden, ohne daß dieser extra zu einem Experiment anreisen muß. Die Geschwindigkeit der Verbreitung technischen Wissens und die Reichweite technikkwissenschaftlichen Denkens und Handelns werden potenziert.

Genau dieser Beschleunigungseffekt wird von Bruno Latour als Antrieb zur Entwicklung immer neuer Einschreibungen durch moderne Technowissenschaft beschrieben:

„The history of technoscience is in a large part the history of all the little inventions made along the networks to accelerate the mobility of traces, or to enhance their faithfulness, combination and cohesion, so as to make action at a distance possible.“ (Latour 1987, S. 254)

Die schnelle Erzeugung stabiler Zusammenhänge von Fakten und vor allem die Möglichkeit zu ihrer einfachen Manipulation und Kombination ermöglicht es, von einem einzigen „Berechnungszentrum“⁷⁴ aus Menschen und Materialien schnell und reibungslos zu mobilisieren und zu kontrollieren. Eine solche gleichzeitige Steigerung der Effektivität und Geschwindigkeit der Beherrschung von Menschen, Märkten und Materie wird in der FEM-Simulation auf geradezu beispielhafte Weise realisiert.⁷⁵ Als ein wesentlicher Bestandteil der Steigerung der Wirkungsmacht technologischen Wissens muß dabei die Funktion des Computers als einer einheitlichen Plattform für die verschiedensten Formen von Berechnungen und Manipulationen gesehen werden. Die Komponenten der digitalen Datenverarbeitung übernehmen dabei die Funktion der von Latour als entscheidende Träger technikkwissenschaftlicher Wirkungsmacht

73 Vgl. Shapin/Schaffer (1985).

74 Ich halte diese Übersetzung von Latours „Calculating Center“ für günstiger als „Rechenzentrum“ weil letzteres mittlerweile schon stark von den zentralen Einrichtungen der Computertechnik belegt ist. Allerdings sind solche Rechenzentren ein äußerst wichtiges Element des „Calculating Centres“. Die Computertechnik ist aber nicht das einzige machststeigernde Instrument zentraler Kontrolle von Technowissenschaft, wie gerade die Mannigfaltigkeit der FEM gezeigt hat.

75 So hebt etwa folgendes Zitat den Beschleunigungsaspekt hervor:

„Vor dem Aufkommen der Supercomputer arbeiteten die Ingenieure nur mit Modellen und, wenn sie physikalische Eigenschaften wie Druck und Spannung messen wollten, mit Prototypen. Heute dagegen sitzt der Ingenieur vor dem Graphikbildschirm eines Supercomputers oder Arbeitsplatzrechners und kann sofort ermitteln, wie sich das soeben entwickelte Bauteil unter Krafteinwirkung verhält. Bei Bedarf kann er seine Eigenschaften mit nur einem Mausklick verändern und ohne Zeitverzögerung die Auswirkungen auf Druck- und Spannungsverteilung sowie andere physikalische Größen beobachten.“ Kaufmann/Smarr (1994, S. 164).

hervorgehobenen papierförmigen, zweidimensionalen Einschreibungen, die zuvor die Bewegung dreidimensionaler Objekte vom Schreibtisch aus ermöglichten.⁷⁶ Gegenüber diesen werden die Möglichkeiten der Kombinierbarkeit mit verschiedenen Systemen technologischer Verwertung von Welt noch vielfach gesteigert. Es wurde gezeigt, wie verschiedene Techniken und Komponenten die FEM zu einem äußerst wirkmächtigen Stabil-Mobil machen.

3.4.14 Finite Soziale Elemente

Die Analyse hat gezeigt, daß sich die Finite Elemente Methode als ein effektives Stabil-Mobil zum Transport transformierter materiell-gesellschaftlicher Strukturen beschreiben läßt. Es bleibt jedoch zu fragen, welche Folgen gerade diese Transformationsweise für die Möglichkeiten des Umgangs mit den derart produzierten Technologien hat. In Abschnitt 2.7 wurden zur Kennzeichnung der Zusammenhänge zwischen Technologieentwicklung und gesellschaftlichem Umgang mit technischen Systemen die Kategorien „Transparenz der Funktionsweise“, „Flexibilität gegenüber unvorhergesehenen Einwirkungen und verschiedenen Einsatzweisen“, „Komplexität der Kontrollstrategie“ und die „Eingriffsmöglichkeiten in die Entwicklung und Bedienung“ vorgeschlagen. Was läßt sich aus den Ergebnissen der Untersuchung über diese Eigenschaften von Technologien, die mit der Hilfe der FEM entwickelt wurden, herleiten?

Flexibilität und Kontrolle

Die FEM-Modellierung ist hier als ein Teil der technologischen Rekonstruktion von Welt, wie sie schon die neuzeitliche Naturwissenschaft kennzeichnet, interpretiert worden. Damit können hinsichtlich der gesellschaftlichen Verwendung des produzierten Wissens und der entwickelten Technologie erste Schlüsse aus einer Analogie zu der Verwendung der Ergebnisse moderner Laborwissenschaften gezogen werden. Die historische Herausbildung des spezifisch neuzeitlichen Zusammenhangs zwischen der Form Wissenserzeugung und der Verwendung ihrer Ergebnisse läßt sich als ein dialektischer Prozeß beschreiben. So konstatiert Böhme (1992a):

„Scientific-technological progress has led to an overburdening of man, who now finds it necessary to manipulate. This dialectic has brought to light what has been overlooked in the concept of nature domination – namely, the fact that dominated nature must ‘play along’. [...] The progress of nature domination has suppressed and made ineffective nature’s own activity such that the necessity for men to maintain these processes, to steer and reproduce systems by means of conscious manipulation, has continually increased.“ (S. 15)

Diese Zweischneidigkeit menschlicher Naturbeherrschung läßt sich auch für die auf Computersimulation basierende Technologieentwicklung nachvollziehen. So ist es zwar offensichtlich, daß die Transformationen im Computerlabor die Entwicklung technischer Systeme mit immer höheren Leistungen und präziseren Zielvorgaben ermöglichen. Gleichzeitig ist aber auch zu beobachten, daß der Preis, den die moderne Laborwissenschaft für den Erhalt der Gültigkeit ihrer Resultate zahlen muß, auch für das Funktionieren des Computerlabors eingefordert wird. Jede Zurichtung, die zur Erhöhung von Geschwindigkeit und Bequemlichkeit von zentraler Kontrolle

⁷⁶ „The result is that we can work on paper with rulers and numbers, but still manipulate three dimensional objects ‘out there’“ Latour (1988, S. 46). Vgl. zu diesem Aspekt auch Kapitel 4 dieser Arbeit.

aus dem Computerlabor getroffen wurde, muß bei der Implementation der Technologie durch neue Zurichtungen in der Komplexität der Wirklichkeit wieder eingeholt werden. So wie begradigte Flüsse hohe Deiche erfordern, so zwingt auch immer zielgenauer entwickelte Technologie zu immer ausgefeilteren Kontrollstrategien zur Disziplinierung von Mensch und Material. Die Erhöhung des Abstands zum einzelnen konkreten Objekt technikwissenschaftlicher Forschung beschleunigt zwar die Ergebnisproduktion, zieht aber auch einen hohen Aufwand an Kontrolle und Abgrenzung der mühsam zugerichteten Weltausschnitte nach sich. So müssen z. B. Optimierungsergebnisse durch extrem genaue Fertigung und strenge Einhaltung der im numerischen Experiment vorausgesetzten Randbedingungen „realisiert“ werden. Anderenfalls besteht die Gefahr, daß unverhoffte Elche die hochgezüchtete Technologie zum Kippen bringen. Die Flexibilität solcher spezialisierten Technologien, die sehr nah an der Grenze des Möglichen arbeiten, gegenüber ungeplanten Verwendungsweisen ist häufig sehr gering.⁷⁷ Sowohl an die menschliche Bedienung als auch an die „technische“ Kontrollstrategie stellen hochoptimierte technische Systeme, wie sie typischerweise mit FEM-Berechnungen entwickelt werden, sehr hohe Anforderungen.⁷⁸ Mit diesen Überlegungen soll keinesfalls impliziert werden, jede simulierte Technologie sei eine potentielle Gefahr für ihre Umgebung. Im Gegenteil haben einige der vorgestellten Beispiele gezeigt, daß Computersimulation wesentlich zu einer Erhöhung der Sicherheit und Benutzerfreundlichkeit technischer Artefakte beitragen kann. Entscheidend ist jedoch, daß mit den Möglichkeiten der analytisch basierten Computersimulation technische Systeme realisiert werden können, die sowohl von ihren eigenen Bestandteilen als auch von ihrer Umgebung ein „Mitspielen“ nach sehr genau festgelegten Spielregeln verlangen.

Eingriffe und Transparenz

Was die Möglichkeiten des Eingriffs verschiedener Akteure in den Prozeß der Technikentwicklung betrifft, so muß hier zwischen prinzipiellen Überlegungen und der Realität industrieller Technikentwicklung mit kommerzieller FEM-Software unterschieden werden. Gerade das Zusammenspiel beider Ebenen macht jedoch die tatsächliche Wirkungsweise aus.

In allen untersuchten Beispielen war der Wunsch „funktionale Zusammenhänge“, die in den behandelten Weltausschnitten wirken, zu ermitteln, eine wesentliche Motivation der Untersuchung. Man erhofft sich von der Anwendung der FEM eine Erhöhung der Transparenz der ablaufenden Vorgänge und damit eine Steigerung der Eingriffsmöglichkeiten. Wie bei jeder analytischen Modellierung ist es das Ziel, einen Zusammenhang, der bisher zwar vielleicht auf der Basis von Erfahrungsregeln behandelt, aber nicht in seinem Wirken verstanden worden ist, in eine „White-Box“ zu verwandeln, deren innere Prinzipien klar zutage treten und möglichst viele Manipulationen erlauben. Gelänge dies, so wären die Möglichkeiten technische Systeme zu gestalten, die auf der Basis solcher Modellierungen entwickelt werden, schlagartig vermehrt. Die Art und Weise wie die Vielzahl der neuen Eingriffsmöglichkeiten genutzt würden, wäre dann „nur noch“ davon abhängig, wieviele und welche Akteure bei der an die

⁷⁷ Vgl. z. B. die extremen Anforderungen, die in der numerisch unterstützten Verdichterauslegung realisiert werden (Seite 81 ff) oder das auf Seite 80 geschilderte Dilemma zielgenauer Optimierung der Windkanalwaage.

⁷⁸ Vgl. auch die Ausführungen zu der durch Computersimulation angestoßenen Verbreitung aktiver Komponenten und mechatronischer Systeme in Abschnitt 2.2.

Modellierung anschließende Technikgestaltung beteiligt werden. So könnte die Frage nach Optimierungskriterien, wie etwa danach, ob bei der Auslegung eines Flugzeugtriebwerkes eher die Lautstärke oder die Energieeffizienz im Vordergrund stehen soll, als eine politische Frage von den „technischen“ Vorarbeiten abgekoppelt werden. Daß diese Vorstellung schon vom Prinzip der FEM her unzutreffend ist, haben die durchgeführten Untersuchungen gezeigt. Wie jede analytische Formalisierung von Welt ist auch die FEM-Modellierung in ihrem Vorgehen notwendig von den Zwecken der Modellierung geleitet. Eine neutrale Sichtbarmachung von in der Natur vorgefundenen Wirkungsprinzipien ist nicht möglich. Vielmehr werden von Beginn an Grenzen gezogen und Raster angelegt, die das Modellierungsanliegen widerspiegeln. Entscheidend ist das Funktionieren der Zusammenhänge bei der Intervention in Welt oder – mit Margaret Morrison – die Funktion als Instrument bei der Erzeugung technologisch verwertbaren Wissens. Was jedoch Funktionieren bedeutet, ist von vornherein eine Frage, in der gesellschaftliche Strukturen eine mindestens ebenso große Rolle spielen wie Verhaltensweisen materieller Komponenten.⁷⁹ Damit ist es offensichtlich, daß entscheidende Eingriffe in die Funktionsweise technischer Artefakte nur während des Modellierungsvorganges durch eingeweihte Personen stattfinden können.⁸⁰ Keine noch so gelungene Visualisierung kann die Komplexität der Zurichtungen, die im Verlauf der Modellierung stattfinden, für den Laien verständlich machen. Im Gegenteil zeigt sich die Tendenz, daß das hohe Abstraktionsniveau der Finiten Formalisierung dazu führt, daß immer weniger Experten in diesem Prozeß wirklich mitwirken können. Wie sieht es jedoch für diese Experten – zu denen ja die in Abschnitt 3.4.9 zu Wort gekommenen Doktoranden sicherlich zählen – mit der Erhöhung der prinzipiellen Möglichkeiten zum Eingriff in die Welt aus?

Bei der Auswertung der untersuchten Beispiele wurde deutlich, daß eine konsistente Optimierung eines ganzen Produktes mit der FEM außerordentlich schwierig ist. Meistens kann nur ein Aspekt verbessert werden, ohne daß klar ist, wie die anderen Eigenschaften des technischen Systems dadurch beeinflußt werden. Daher bleibt der Ertrag an wirklich neuen für die Technikentwicklung auch ausnutzbaren „funktionalen Zusammenhängen“ oft erstaunlich gering. Häufig ist es am Ende doch wieder die „Erfahrung des Konstrukteurs“⁸¹ die hier vermitteln muß. Große Teile der Analyse und Behandlung technischer Problemstellungen bleiben, wie weiter oben ausgeführt wurde, ohnehin der FEM-Analyse verschlossen und den klassischen ingenieurwissenschaftlichen Verfahrensweisen vorbehalten. Aus diesem Grund ist auch mit der FEM kein Abheben von allen gekannten Eingriffsmöglichkeiten zu erwarten. Referenzgröße für eine sichere Weiterentwicklung technischer Systeme bleibt die menschliche Erfahrung im Umgang mit der Welt. Eine rein theoretische Analyse ist zum Einen – wie ausgeführt – prinzipiell nicht möglich, zum Anderen aber auch nicht von großem Nutzen.

In dem Verlauf der Untersuchung ist deutlich geworden, daß die tatsächliche Möglichkeit zum Eingriff in die Modellierung und damit die Technikentwicklung in sehr hohem Maße davon bestimmt ist, wie die FEM in die Abläufe industrieller Arbeitstei-

79 Vgl. hierzu Abschnitt 1.1.

80 Dem unbenommen ist natürlich eine Widerständigkeit von Benutzern technischer Artefakte, die vielleicht etwas ganz anderes damit machen. Eine solche nimmt aber in dieser Phase keinen unmittelbaren Einfluß auf die technische Entwicklung.

81 Vgl. das Zitat von Zhai auf Seite 80 dieser Arbeit.

lung eingebunden ist. Je mehr z. B. auf einfache Bedienung der FEM-Software und schnelle Durchführbarkeit von Berechnungen gedrungen wird, desto weniger bestehen von Seiten des FEM-Anwenders noch individuelle Anpassungsmöglichkeiten. Es kann vermutet werden, daß mit der weltweiten Verbreitung einiger weniger FEM-Softwarepakete eine Verschiebung der die Technikentwicklung strukturierenden Faktoren auftritt. Lange Zeit waren es firmenintern etablierte Herangehensweisen an technische Aufgabenstellungen und übergeordnete kulturell gesellschaftliche Rahmenbedingungen, die das Vorgehen der einzelnen Ingenieurin strukturierten. Im Zuge der FEM Einführung werden solche lokalen Ressourcen der Handlungsanleitung Konkurrenz durch die in der Software niedergelegten Konzepte bekommen. Das Vorgehen und Denken von Technikentwickelnden wird sich möglicherweise global angleichen. Diese Vermutung steht nicht in Widerspruch zu der oben getroffenen Feststellung, daß FEM-Modelle erst durch aufwendige lokale Einschreibungen einer Fülle heterogener Elemente ihre Universalität gewinnen. Jeder einzelne Weltausschnitt, der mit der Methode der Finiten Elemente bearbeitet werden soll, muß Zurichtungen unterzogen werden, die nur durch einen hohen Einsatz von personengebundenem, erfahrungsgeleitetem und situativem Wissen erfolgreich sein können. Der Rahmen jedoch, in den die Einzelelemente gebracht werden müssen, die ordnende und anleitende Struktur ist durch das Verfahren und die Software stark vorgegeben. Nicht jede Art von Wissen ist in diesen Rahmen übersetzbar. Dies wird z. B. an den großen Anstrengungen deutlich, die unternommen werden müssen, um Ergebnisse früherer Untersuchungen mit den Ergebnissen von FEM-Berechnungen kompatibel zu machen, wie sie sich etwa bei Pfitzinger zeigen.⁸² Diese strukturierende Funktion der FEM erstreckt sich keinesfalls nur auf das Entwicklungsstadium technischer Artefakte. Wie die in Abschnitt 3.4.7 aufgezeigten Reibungspunkte mit konventioneller Praxis von Technikentwicklung zeigen, müssen sich alle Schritte – von der Durchführung der ersten Versuche bis zur Präsentation der Technologie bei den Kunden – an diesem neuen Rahmen ausrichten. Eine solche Verlagerung strukturierender Komponenten im technischen Entwicklungsprozeß von vielen einzelnen Produktionsstätten zu einigen wenigen zentralen Software-Herstellern bedeutet sicherlich eine Verringerung der Stellen, an denen Eingriffe möglich sind.⁸³ Gleichzeitig werden diejenigen Orte, an denen Entscheidungen getroffen werden, sowohl räumlich als auch strukturell von dem Ort, an dem sie sich Auswirken, entfernt. Die Personen, die an der Gestaltung des Rahmens beteiligt sind (etwa Informatikerinnen und Mathematiker), sind häufig mehr mit der formalen Struktur, als mit den konkreten Anwendungen ihrer Programme befaßt. Mit der Verlagerung von Entscheidungskompetenz in die Softwarebranche geht eine Verschiebung von Wissenserzeugung auf eine stärker formale Ebene einher.⁸⁴ Diese Beobachtungen mit den entsprechend problematischen Konsequenzen für eine demokratische, an lokale Gegebenheiten angepaßte Technikentwicklung, die immer in dem gesamten Reichtum menschlicher Möglichkeiten zur Wissensgewinnung verwurzelt sein muß, gelten im wesentlichen für den industriellen

82 Vgl. Seite 83 dieser Arbeit.

83 Dies ist im Sinne von Latours „immutable mobile“ gerade ein gewünschter Effekt, da mögliche Angriffspunkte auf den Zusammenhalt der zu transportierenden Strukturen eliminiert werden. Entsprechend formuliert z. B. die Firma Sulzer Innotec als Vorteil ihres integrierten Berechnungsprogramms für Turbinen: „Elimination von Benutzereingriffen und damit von möglichen Fehlerquellen“ (Keck u. a. 1997, S. 27). Gemeint ist die manuelle Einarbeitung empirisch bestimmter Randbedingungen, die mit dem neuen Programm wegfällt.

Einsatz modellgestützter Computersimulation mit der Hilfe kommerzieller Software. Sie folgen der Logik des Verwertungszusammenhanges kapitalistischer Produktion und sind nicht der Methode der Finiten Elemente inhärent. So haben gerade die Untersuchungen der ingenieurwissenschaftlichen Dissertationen gezeigt, daß sich die FEM sehr wohl in einen bunten Methodenkanon der Wissensproduktion fruchtbar integrieren läßt, ohne daß erfahrungsgeleitete Wissensbestände an Wert verlieren. Unter dieser Voraussetzung ist es auch möglich, die FEM zur Produktion sehr spezifischen, lokal relevantem Wissens zu nutzen. So konnte in einigen Fällen eine bessere Anpassung technischer Artefakte an lokale Einsatzbedingungen und damit eine größere Sicherheit erreicht werden. Auffällig ist es dabei, daß gerade in solchen sehr sorgfältig ausgearbeiteten Anwendungen, die Grenzen universalisierender Zugriffe bewußt bleiben. So tun sich zwischen euphorischen Schilderungen „Simulierter Welten“⁸⁵, nach deren Vorstellung die Grenzen des technisch Machbaren zukünftig im wesentlichen durch die Grenzen der Kapazität und Geschwindigkeit von Supercomputern gesteckt werden, und den geschilderten bescheidenen Versuchen, bewährte Verfahren technikwissenschaftlicher Wissensproduktion mit FEM-Berechnungen zu ergänzen und zu effektivieren, sowie zwischen der optimistischen Werbung der FEM-Software-Industrie und den zur Vorsicht und Beschränkung aufrufenden Mahnungen von Peter Fröhlich ein Spalt auf, zu dessen Überbrückung wohl noch spezielle Finite Elemente entwickelt werden müssen.

3.4.15 Exkurs: Das Numerische Experiment als dritte Methode der Wissenschaften?

In diesem Exkurs soll versucht werden, die Ergebnisse aus der Untersuchung der FEM in einigen Aspekten auf die Anwendung numerischer Methoden auf analytische Modelle in der Technikentwicklung insgesamt zu erweitern. Insbesondere soll nach der Berechtigung der gängigen Bezeichnung von Computersimulation als „Numerisches Experiment“ und als „dritte wissenschaftliche Methode“ gefragt werden.

Die Ausführungen über die FEM haben gezeigt, daß analytisch basierte Computersimulation ein neuartiges Instrument zur technologischen Verarbeitung von Welt darstellt. Gleichzeitig wurde deutlich, daß diese Erweiterung technischer Interventionsmöglichkeiten auf einer Reihe unterschiedlicher Wissens Elemente und Praxen und auf der wirkungsvollen Einbindung von Computersimulation in andere Systeme der Wissensproduktion beruht. In vielen Veröffentlichungen wird die Wirkungsmächtigkeit analytisch basierter Computersimulation jedoch damit erklärt, daß sie als dritte wissenschaftliche Methode zwischen Theorie und Experiment das Instrumentarium technisch naturwissenschaftlicher Welterklärung komplettiere.

So schreibt der Aerodynamiker John D. Anderson (1984) in einem einschlägigen Lehrbuch aerodynamischer Grundlagen:

84 Diese Problematik der Trennung zwischen Eingriffsmöglichkeit und Fachkompetenz wird unter IngenieurInnen durchaus gesehen und diskutiert. So konstatiert etwa Pfitzinger in Zusammenhang mit der Frage nach einer automatischen Optimierung technischer Artefakte: „Der Entwicklungsingenieur kennt meist die Schwächen eines Rechenverfahrens und kann sie bei der Beurteilung der Ergebnisse berücksichtigen. Eine solche differenzierte Bewertung ist im automatisierten Auslegungsprozeß in der Regel nicht möglich, so daß hier auch falsche Zwischenergebnisse die Optimierung in eine bestimmte Richtung drängen.“

85 Smarr/Kaufmann (1993, Titel)

„CFD [Computational Fluid Dynamics P.W.] is a new ‘third dimension’ in aerodynamics, complementing the previous dimensions of both pure experiment and pure theory. It allows us to obtain answers to fluid dynamics problems which heretofore were intractable by classical analytical methods. Consequently, CFD is revolutionizing the airplane design process, and in many ways is modifying the way we conduct modern aeronautical research and development.“ (S. 450).

Und die Physiker Kaufmann und Smarr (1994) in ihrem schon mehrfach zitierten Buch über Computersimulation:

„Nun hat die Entwicklung der Computer die Naturwissenschaften um einen dritten methodischen Ansatz bereichert.“ (S. 16)

Ähnlich Fritz Rohrlich (1990, S. 507):

„The central claim of this paper is that computer simulation provides (though not exclusively) a qualitatively new and different methodology for the physical sciences, and that this methodology lies somewhere intermediate between traditional theoretical physical science and its empirical methods of experimentation and observation“⁸⁶.

Auch die häufig verwendete Bezeichnung von Computersimulation als „numerisches Experiment“⁸⁷ weist auf deren Mittlerstellung zwischen Fundamentaltheorie und dem klassischen Laborexperiment hin. Im folgenden soll zuerst dieser Bezeichnung näher nachgegangen werden, um dann auf die Frage nach Computersimulation als dritter wissenschaftlicher Methode zu kommen.

Welche Eigenschaften des Labor-Experimentes sind es, die sich in der Simulation eines Systemverhaltens wiederfinden? Zunächst kann festgestellt werden, daß die formale Herangehensweise an eine technisch/wissenschaftliche Problemstellung bei einer Computersimulation nach Abschluß der Modellierung tatsächlich ähnlich wie bei einem klassischen Laborexperiment ist. Mit einer jeden Simulation wird – wie in einem realen Experiment – nur jeweils ein Fall für ein Systemverhalten (unter bestimmten Rand- und Anfangsbedingungen) untersucht. Werden die Bedingungen wie etwa die Eingangsgröße oder die Systemparameter verändert, muß neu experimentiert/simuliert werden. Zwar können solche Variationen, wie oben dargestellt wurde, in einem numerischen Experiment ungleich schneller und einfacher vorgenommen werden, als in einem Laborexperiment. Dennoch bleibt die formale Ähnlichkeit der beiden „Experimentformen“ bestehen: Jede Simulation liefert ebenso wie jedes Experiment nur Aussagen über eine einzige Konfiguration. Weder im klassischen noch im numerischen Experiment können aus den Ergebnissen allgemeine analytische Aussagen über die Zusammenhänge zwischen Systembedingungen und Systemverhalten angegeben werden.⁸⁸ Dennoch bestehen zwischen dem Experiment im klassischen Labor und dem Experiment im Computer meiner Auffassung nach

⁸⁶ Weitere ähnliche Statements geben Anderson (1996, S. 7), Jäger (1992, S. 51 f.), Mattern (1995, S. 24).

⁸⁷ Zum Beispiel bei Humphreys (1991, S. 502), Rohrlich (1991, S. 511/S. 514)

⁸⁸ Allerdings ist es bei Computersimulationen genau wie bei klassischen Experimenten häufig der Fall, daß die erzielten Ergebnisse für einzelne Konfigurationen Anregungen zu der Entwicklung von allgemeinen Theorien geben. Ebenso können die Ergebnisse von Simulationen mathematische Lösungsansätze der Systemgleichungen nahelegen. Oft wird versucht, über die systematische Durchführung von Simulationsläufen aus den Ergebnissen zu allgemeinen Zusammenhängen zu kommen. Vgl. hierzu auch Hartmann (1996, S. 808 Mitte).

wesentliche Unterschiede hinsichtlich der Vermischung materieller und theoretischer Komponenten bei der Wissensproduktion.

Die Eigenschaften und die Rolle des klassischen Experimentes innerhalb moderner Laborwissenschaft hat vor allem Ian Hacking (1983) grundlegend untersucht. Er beschreibt die Produktion stabiler wissenschaftlicher Ergebnisse innerhalb der experimentellen Laborwissenschaften als Zusammenspiel zahlreicher Elemente. Dabei sind an Theorieelementen nicht nur die zu überprüfenden Hypothesen über die untersuchten Objekte, sondern auch Theorien der Instrumente und der Beobachtung (z. B. statistische Verfahren) involviert.⁸⁹ Für ein Computereperiment lassen sich ähnliche Aussagen treffen. Auch hier sind „Theorien von Instrumenten“ in der Form von Theorien über den Computer als Rechenmaschine wesentlich an der Wissensproduktion beteiligt. Die numerischen Algorithmen müssen den Eigenschaften der Rechenmaschine anhand dieser Theorien sorgfältig angepaßt werden. Ein Computerprogramm ist daher selten universell auf jedem Computer einsetzbar (plattformunabhängig). Darüber hinaus spielen die Theorien der numerischen Mathematik über das Verhalten verschiedener Lösungsalgorithmen für Differentialgleichungen eine zentrale Rolle. Zudem kommt dem mathematischen Modell, das als Grundlage jeder Computersimulation dient, eine eigenständige Funktion im Prozeß der Wissensgenerierung zu. Ganz ähnlich wie es von Hacking für die klassischen Laborwissenschaften beschrieben wird, werden diese Theorieelemente aufeinander abgestimmt, um stabile Aussagen zu gewinnen. Dabei ist das einzelne numerische Experiment nur ein kleiner Ausschnitt des gesamten Prozesses der Wissenserzeugung durch Computersimulation. Die Untersuchung der FEM hat deutlich gezeigt, daß gerade der Abgleich zwischen Laborexperiment und Simulationsexperiment erhebliche Aufwendungen erfordert. Viele Simulationsläufe und Validierungen an Laborexperimenten sind nötig, bis ein numerisches Experiment so ausgewertet werden kann, daß es mit einem Laborexperiment in der Weise, wie es von vielen Autoren, die den Begriff numerisches Experiment verwenden, getan wird, überhaupt verglichen werden kann. Hier wird – für beide Formen des Experimentes – häufig ein Produkt eines langen Prozesses isoliert betrachtet. Bezieht man jedoch die Zurichtungsprozesse mit ein, so zeigt sich, daß jede dieser Methoden der Wissensproduktion eigene Charakteristika hat.

Ein wesentlicher Unterschied liegt in der Einarbeitung der Grundlagentheorie, die das zu untersuchende physikalische Geschehen beschreibt. Bei einem numerischen Experiment ist diese auf viel direktere Weise beteiligt als in einem Laborexperiment.⁹⁰ Letztlich sind es lediglich die Konsequenzen der theoretischen Annahmen, die eine Computersimulation „ausrechnet“. Während in einem klassischen Laborexperiment zahlreiche theoretischen Annahmen schon in praktische Handlungsanweisungen übersetzt wurden (Beispiel: Es wurde eine konstante Umgebungstemperatur „hergestellt“) besteht ein Computereperiment nur aus theoretischen Annahmen (Beispiel: die Umgebungstemperatur wird als konstant gesetzt). Entsprechend sind die Zurichtungen, denen die Objekte des Experimentes unterworfen werden, im Computereperiment nicht praktischer sondern rein theoretischer Natur. Die konkrete Experimentsituation wird in einem numerischen Experiment, wie für die FEM oben

⁸⁹ Hacking (1992, S. 30).

⁹⁰ In einem Laborexperiment kann die zu überprüfende Theorie selbst z. B. in der Instrumententheorie verarbeitet sein oder sich in der Konzeption des Experimentes niederschlagen. Vgl. Hacking (1992, S. 45).

beschrieben wurde, durch einen von dem Computerprogramm vorgegebenen Satz von Parametern identifiziert (z. B. Stoffkennwerte, Geometriedaten, Belastungsfälle). Das Objekt wird während der Modellierung durch die Festlegung dieser Werte erst geschaffen. Unvorhergesehene Eigenschaften des Objektes können nicht auftreten und auf das Experiment einwirken.⁹¹ Die Dekontextualisierung der Objekte geschieht nicht durch praktische Heraustrennungen aus der „natürlichen Umgebung“ sondern durch Entscheidungen, die im Verlauf der Formalisierung getroffen werden. Diese Entscheidungen sind durch die Anforderungen an die Formalisierungsweise, die das Modellierungsverfahren und die Rechnerarchitektur vorgeben, in der gleichen Weise bedingt, wie die praktischen Zurichtungen des klassischen Laborexperimentes von den zur Verfügung stehenden Laborinstrumenten.

Bei der Entwicklung erfolgreicher Simulationsverfahren ist das wesentliche Moment die Abstimmung der verschiedenen Algorithmen und Theorien aufeinander und ihre konsistente Formulierung in einer durch das Modellierungsverfahren vorgegebenen formalen Sprache. Alle Annahmen, die über das Objekt getroffen werden, müssen in einer rechnerisch faßbaren Weise expliziert werden, wenn sie in das Modell eingehen sollen. Die strukturierende Wirkung durch die Modellierungssprache gewinnt damit bei dieser Form der Wissensgenerierung eine große Bedeutung. Darüber hinaus müssen bei der computergerechten Modellierung auch zahlreiche praktische Bedingungen eingehalten werden. So spielen computerbedingte Aspekte wie Rechengenauigkeit, Rundungsfehler, Plattformunabhängigkeit, Rechenzeit etc. schon bei der Entwicklung von Modellen zur Computersimulation eine wichtige Rolle.

Welche Zurichtungen im Einzelnen auf dem Hin- und Rückweg über die Simulationsbrücke stattfinden, kann nur für jedes Modellierungsverfahren einzeln analysiert werden. Aus den bisher angestellten Überlegungen lassen sich jedoch einige grundlegende Aussagen ableiten.

Während im klassischen Experiment die Theorie mit der Kausalität materieller Strukturen verknüpft wird, werden in einer Computersimulation theoretische Annahmen gegeneinander getestet. Ein numerisches Experiment ist daher zuallererst ein Experiment der Theorie. Erst die Ergebnisse einer Computersimulation, die das Verhalten eines Systems voraussagen, werden an der Wirklichkeit des klassischen Experimentes validiert. Diese spezifische Weise des Theorie-Realität Abgleichs ist auch der Kern der Rede von der dritten wissenschaftlichen Methode. Trotz der berechtigten Feststellung einer neuen Qualität wissenschaftlich-technischer Analyse von Welt, werde ich diese Bezeichnung nicht verwenden, da sie auf einer idealisierten Annahme „reiner“ Wissenschaft mit zwei sauber zu trennenden Methoden beruht. Vielmehr gehe ich im Anschluß an Hacking von einem vielfältig durchmischten Methodenkanon wissenschaftlicher Intervention und Repräsentation aus, in dem sich mit der Etablierung von Simulationstechniken neue Mischungsformen bilden. Daher scheint es mir auch nicht angemessen, die These von der „dritten Methode“ mit dem Argument zurückzuweisen, es handele sich bei Simulation lediglich um „theoriegestützte Deduktion“.⁹² Ebenso wie das klassische bildet auch das numerische Experiment nur eine Bezeichnung für ein hybrides Zwischenprodukt der unterschiedlichsten Praktiken menschl-

91 Unvorhergesehene Rechenergebnisse, wie z. B. die Ablösung einer Strömung oder das Auftreten einer unvermuteten Wärmesenke können jedoch durchaus auftreten.

92 Hartmann (1995, S. 808 unten).

3.4 Die Finite Elemente Methode

chen Zugriffs auf Zusammenhänge in der Welt. Es kann allerdings festgestellt werden, daß sich mit dem numerischen Experiment als Kernbestandteil technikwissenschaftlicher Computersimulation eine ungeheuer wirkungsmächtige spezifische Form der Wissensgenerierung herausbildet. Entscheidend für die Neuartigkeit sind jedoch meiner Einschätzung nach keine epistemologischen Besonderheiten dieser Methode, sondern die Beschleunigung und Effektivierung der Produktion von Wissen über eine stabile Zurichtung von Welt, wie sie oben beschrieben wurde.

3.5 Fuzzy-Modellierung

3.5.1 Vorbemerkung

Die Fuzzy-Logik ist ein Kalkül, das in der Technikentwicklung in zunehmendem Maße zur Formalisierung von Prozessen verwendet wird, die technisch verarbeitet werden sollen. Den äußerst verschiedenartigen Anwendungen liegt das schon beschriebene Anliegen jeder technisch motivierten Modellierung zugrunde: In einem irgendwie gearteten Prozeß werden Eingangsgrößen zu Ausgangsgrößen umgewandelt. Dieser Vorgang soll gezielt beeinflußt werden. Dazu muß ein regelhafter Zusammenhang zwischen den Größen des Systems in einer formalen Sprache nachgebildet werden. Während dies, wie in Abschnitt 3.3 geschildert wurde, bei der analytischen Modellierung über die mathematische Beschreibung von Beziehungen zwischen zahlenmäßig erfaßbaren physikalischen Größen geschieht, werden in Fuzzy-Modellen symbolische Variablen verarbeitet. Wenn im folgenden die zentralen Eigenschaften des Fuzzy-Formalisierungsverfahrens näher beschrieben werden, so ist damit keine vollständige Darstellung des sehr komplexen Feldes der Fuzzy-Logik beabsichtigt. Dazu muß auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen werden.⁹³ Viele Konzepte werden stark vereinfacht dargestellt, andere Aspekte der Fuzzy-Logik, die in der ingenieurwissenschaftlichen Praxis keine große Rolle spielen, werden gar nicht behandelt. Ganz ohne „technische“ Details kommt man allerdings nicht aus, wenn man verstehen will, in welcher spezifischen Weise in Fuzzy-Modellen Wirklichkeit verarbeitet und umgeformt wird.

3.5.2 Fuzzelige Modelle – Das Modellierungsverfahren

Fuzzy-Logik ist ein formales Sprachsystem, das die Verknüpfung von Propositionen, also Aussagen über Dinge, zu Relationen ermöglicht. Einfache Relationen sind Verknüpfungen wie „und“ und „oder“. Außerdem können auch Implikationen („wenn ... dann“) gebildet werden. Aus diesen Elementen können Regeln aufgebaut werden, die jeweils aus einem Prämissenteil und einem Konklusionsteil bestehen. Ein Satz solcher Regeln wird als Regelbasis bezeichnet. Zur Auswertung der Regelbasis wird ein Verfahren des logischen Schließens – der Inferenzmechanismus – formuliert. Welche der Regeln jeweils zur Anwendung kommen, hängt von dem Erfüllungsgrad der Regel-Prämissen und damit von dem aktuellen Systemzustand ab. Bis hierher unterscheidet sich die Fuzzy-Logik nicht von anderen formalen Sprachsystemen des symbolischen Rechnens, wie sie im Bereich der sogenannten Künstlichen Intelligenz (KI) zur For-

93 Zur Fuzzy-Logik gibt es eine Fülle von Fachliteratur aus den verschiedensten Bereichen (Mathematik, Elektrotechnik, KI-Forschung, Psychologie, Regelungstechnik...) aber auch einige „populärwissenschaftliche“ Veröffentlichungen. Eine klassische Heldengeschichtsschreibung liefern z. B. die Wissenschaftsjournalisten McNeill/Freiberger (1996) in ihrem Buch: „Die ‘unscharfe’ Logik erobert die Technik“. Sie behandeln neben einigen technischen auch „philosophische“ Aspekte der „unscharfen Logik“ und beschreiben detailliert einzelne Forscherpersönlichkeiten. Ebenfalls auf Fuzzy-Logik als „Weltanschauung“ zielt Kosko (1993) in seinem Buch „fuzzy-logisch“. Der gleiche Autor liefert mit seinem 1997 erschienenen „Fuzzy Engineering“ eine extrem nüchterne an der Ingenieurmathematik orientierte Darstellung der Thematik, die eher für ein mathematisch versiertes Fachpublikum geeignet ist, aber dafür sehr praxisnahe (und damit komplexe!) Beispiele enthält. Eine gute Mischung bietet Ross (1995) in seinem als universitäres Lehrwerk und Schulungsgrundlage konzipierten „Fuzzy Logic with Engineering Applications“. Hier werden sowohl die konzeptionellen Grundlagen als auch verschiedene Anwendungsbereiche in einer dem Uneingeweihten gerade noch zugänglichen Form geschildert. Für den Bereich der Fuzzy-Control ist das Buch „Fuzzy-Control für Ingenieure“ von Jörg Kahlert (1995) zu empfehlen. Kahlert ist stark an der klassischen Regelungstechnik orientiert und bettet den Fuzzy-Ansatz überzeugend in die klassischen Konzepte ein.

malisierung von Entscheidungsprozessen verwendet werden. Das entscheidende Charakteristikum der Fuzzy-Logik ist jedoch die Art und Weise, in der die Propositionen formalisiert werden. Dieses Formalisierungsverfahren soll im folgenden Abschnitt genauer beschrieben werden. Danach wird dann der Inferenzmechanismus näher betrachtet.

Die fusselige Einteilung der Welt – Fuzzifizierung

Grundlage der Fuzzy-Formalisierung ist die Fuzzy-Mengentheorie. Diese wurde in den 1960er Jahren von Lofti. A. Zadeh, einem Professor für Elektrotechnik aus Berkeley, entwickelt. Aus seiner Sicht und auch aus der der meisten Fuzzy-Theoretiker handelt es sich bei der Fuzzy-Mengentheorie um eine Generalisierung der klassischen zweiwertigen und auch der mehrwertigen Logik. Im Gegensatz zur klassischen Logik, in der ein Element eine Eigenschaft (aufgefaßt als Zugehörigkeit zu einer Menge) nur entweder ganz oder gar nicht aufweist, ist eine Fuzzy-Menge dadurch gekennzeichnet, daß sie Elemente mit verschiedenen Graden von Zugehörigkeit zuläßt. Diese Grade werden den Elementen über die sogenannten Zugehörigkeitsfunktionen zugewiesen (vgl. Abbildung 4). Fuzzy-Mengen haben daher keine scharfen Grenzen. Diese „Unschärfe“ liegt dem Namen Fuzzy (fusselig, unscharf) zugrunde.⁹⁴

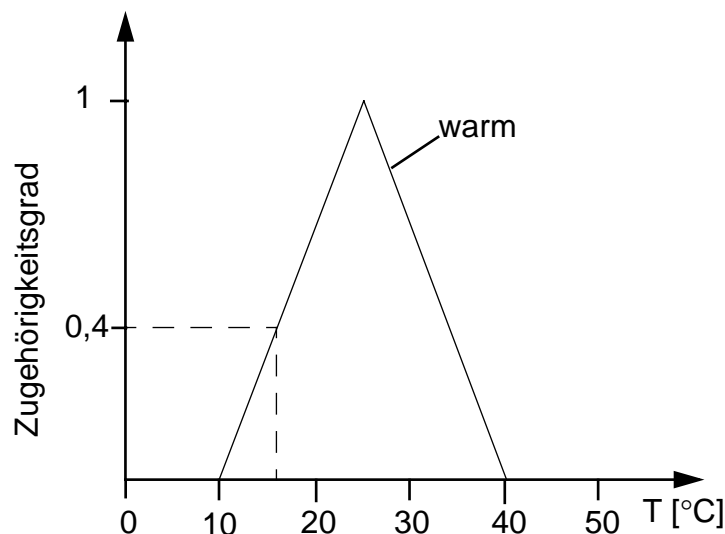


Abbildung 4 Mögliche Zugehörigkeitsfunktion zu der Fuzzy-Menge „warm“. Über diese Funktion wird jeder Temperatur eine Zugehörigkeit zu der Fuzzy-Menge zugewiesen.

Das Konzept der Fuzzy-Mengen eignet sich nun nach Auffassung vieler seiner Anwender besonders zur Formalisierung linguistischer Variablen, also von Begriffen, die in der Umgangssprache zur Kennzeichnung und Bewertung von Systemzuständen

⁹⁴ Dieser Name ist kein Spitzname sondern wurde von Zadeh selbst bewußt gewählt. (Vgl. Mc Neill/Freiberger 1996, S. 69 ff.). In vielen Publikationen wird beklagt, der Name habe der Entwicklung der Fuzzy-Logik sehr geschadet, da er (im angelsächsischen Sprachraum) einen unseriösen und unwissenschaftlichen Klang habe. Es wird mehrfach berichtet, daß Firmen die Anwendung von Fuzzy-Konzepten mit dem Argument ablehnten, dies würde dem seriösen Ruf der Firma schaden. Manche Anwendungen wurden daher unter anderem Etikett (z. B. „nichtdeterministisches Schließen“) durchgeführt. Von diesen Bezeichnungen hat sich aber keine durchgesetzt. In Japan dagegen ist der Begriff Fuzzy (der offenbar direkt aus dem Englischen übernommen wurde) von Beginn an in Verbindung mit intelligenter Technik gebracht und durchweg positiv besetzt worden.

3.5 Fuzzy-Modellierung

verwendet werden. Ein häufig angeführtes Beispiel für eine solche Verwendung der Fuzzy-Mengentheorie ist die Klassifizierung von Temperaturen. Soll mithilfe klassischer Logik entschieden werden, ob eine Temperatur als warm gelten soll, kann dies nur geschehen, indem ein Temperaturintervall wie beispielsweise $20\text{--}30^\circ\text{C}$ als „warm“ festgelegt und der gemessene Temperaturwert damit verglichen wird. Ein Meßwert von $19,9^\circ\text{C}$ wird dann ebenso wenig wie etwa 5°C als warm bewertet werden. Die Fuzzy-Mengentheorie jedoch macht es jedoch, wie in Abbildung 4 zu erkennen ist, möglich, eine Temperatur als zu einem bestimmten Grad (hier 0,4) „warm“ zu kennzeichnen.

Auf die beschriebene Weise kann der gesamte für ein Anwendung relevante Wertebereich einer Variablen über Fuzzy-Mengen klassifiziert werden. Dieser Schritt wird als „Fuzzifizierung“ bezeichnet. Eine mögliche Fuzzifizierung der Temperaturen von $0\text{--}50^\circ\text{C}$ zeigt Abbildung 5. Die Fuzzy-Mengen können sich überlappen, so daß ein Objekt mehreren Klassen zugleich angehören kann. So ist etwa in Abbildung 5 zu erkennen, daß eine Temperatur von 20°C zu einem hohen Grad der Fuzzy-Menge „warm“ aber gleichzeitig auch zu einem geringen Teil der Fuzzy-Menge „kalt“ zugehörig ist. Manche Fuzzy-Theoretiker postulieren, mit diesem Konzept sei die aristotelische Logik und vor allem das Prinzip vom ausgeschlossenen Dritten durchbrochen, da ein Fuzzy-Objekt gleichzeitig A und Nicht-A sein kann.⁹⁵

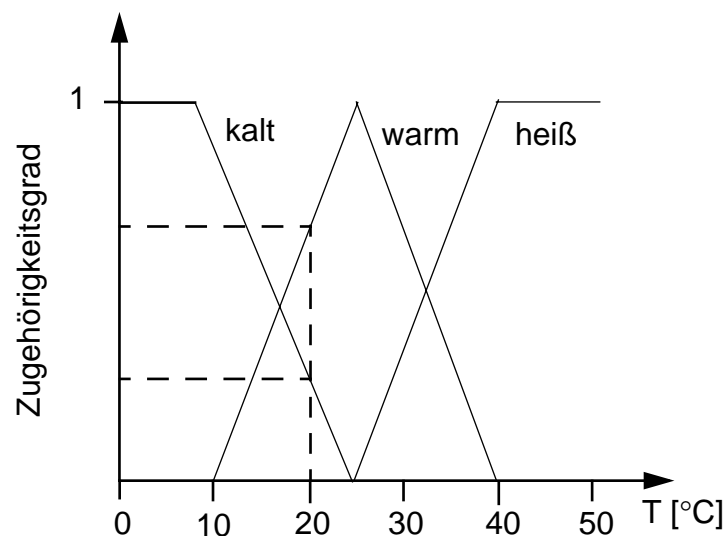


Abbildung 5 Fuzzifizierung eines Temperaturbereiches. Durch das Überlappen der Zugehörigkeitsfunktionen können einzelne Temperaturen gleichzeitig mehreren Mengen zu verschiedenen Graden zugehören.

Um einen technischen Vorgang mit Fuzzy-Logik zu formalisieren, müssen seine Eingangs- und die Ausgangsgrößen fuzzifiziert werden. Für jede Größe legt man dazu zunächst linguistische Terme, wie im Falle der Temperatur „kalt, warm und heiß“, zur Kennzeichnung der Fuzzy-Mengen fest. Dann werden die Zugehörigkeitsfunktionen bestimmt, die Zahlenwerte und linguistische Terme einander zuordnen.

⁹⁵ Vgl. etwa McNeill/Freiberger (1996, S. 75).

Die Fuzzifizierung beinhaltet somit zwei wesentliche Übersetzungs- und Ordnungsvorgänge. Zuerst werden Entitäten in eine strukturierte sprachliche Beschreibung gefaßt. Dann wird diese Beschreibung über einen mathematischen Formalismus in Zahlenwerte übersetzt. Die fuzzy-typische Art der Klassifizierung von Eigenschaften entspricht nach der Auffassung vieler Fuzzy-Logik Experten der Art und Weise, in der menschliche Akteure Zustände von Objekten beschreiben. So postuliert etwa Zadeh in dem Vorwort zu einem Fuzzy-Lehrbuch:

„no methodology other than Fuzzy Logic provides machinery for dealing with fuzzy information granulation in ways that parallel human reasoning and decision making.“ (Pedrycz/Gomido 1998, S. xiv).

Darüberhinaus wird in ingenieurwissenschaftlichen Kontexten oft angeführt, das Konzept der Fuzzy-Mengen käme der Beschaffenheit der Realität entgegen. So heißt es in den Nachrichten des VDI (Verein deutscher Ingenieure):

„Die unscharfe Mengenlehre verstößt zwar gegen die klassische Mathematik, weil sie aber der Realität umso ähnlicher ist, ist sie inzwischen aus vielen Technikbereichen nicht mehr wegzudenken“ (Haars 1997, S. 15).

Daß die Fuzzy-Mengentheorie auf diese Weise „Unschärfe“ verarbeitet, bedeutet jedoch nicht, daß in der Fuzzy-Logik nicht mit exakten Zahlenwerten gerechnet würde. Im Gegenteil ist es gerade ein Unterschied der Fuzzy-Logik zur klassischen Künstlichen Intelligenz, in der ausschließlich mit symbolischen Variablen operiert wird, daß hier den linguistischen Begriffen über die Zugehörigkeitsfunktionen Zahlenwerte zugewiesen werden.⁹⁶ Während z. B. Expertensysteme ihre Ergebnisse in der gleichen symbolischen Form herausgeben müssen, in der das Expertenwissen eingegeben wurde, kann ein Fuzzy-Algorithmus nach der Fuzzifizierung mit Zahlen arbeiten und auch das Ergebnis der Fuzzy-Operationen können einfache Zahlenwerte sein. Die Fuzzifizierung stellt ein leistungsfähiges Übersetzungsverfahren von Worten in Zahlen zur Verfügung und wird damit als Formalisierungskonzept für die Technikentwicklung in einer Breite interessant, welche die der KI Anwendungen übertrifft.

Das „Unscharfe Schließen“ und seine scharfen Ergebnisse – Inferenz und Defuzzifizierung

Neben den Systemvariablen müssen für eine Fuzzy-Modellierung auch die Regelbasis und die Inferenzvorschriften formalisiert werden.⁹⁷ Hierzu dienen verschiedene Operatoren. Diese Operatoren beschreiben Rechenoperationen, mit denen die logischen Verknüpfungen, die in den Regeln und im Inferenzmechanismus auftauchen, realisiert werden.⁹⁸ Sie leisten damit die Übersetzung von der linguistischen Fassung einer Regelbasis und eines Inferenzverfahrens zu Ketten von Rechenoperationen. Die Schlußfolgerung aus einem Fuzzy-Inferenzverfahren besteht in einer Fuzzy-Menge der Ausgangsvariablen. Da in den meisten technischen Systemen als Konsequenz aus

96 Pedrycz und Gomido (1998, S. xxii) „In our opinion, fuzzy sets play a dominant role when it comes to building bridges between symbolic and numeric computation. [...] Fuzzy sets use symbols (linguistic terms) as does AI [Artificial Intelligence, P.W.], yet fuzzy sets go far beyond this point, for these symbols come equipped with well defined semantics that, once converted into numeric membership functions, provide a handle for further intensive numeric processing of these concepts.“

97 Hier bleibt zunächst unberücksichtigt, wie die Regeln überhaupt zustandekommen.

98 Ein Beispiel: Für die „Und“ Verknüpfung kann, wie in Abb. 6 gezeigt ist, der „Minimum Operator“ gewählt werden.

der Lagebewertung eine konkrete Anweisung verlangt ist (z. B. ein Ventil um einen ganz bestimmten Betrag zu öffnen), steht am Ende meistens noch die sogenannte Defuzzifizierung. Dabei wird aus der Fuzzy-Menge, die das Ergebnis der Inferenz bildet, ein einzelner diskreter Wert für die Ausgangsgröße bestimmt. Zur Defuzzifizierung gibt es wiederum verschiedene mögliche Verfahren.

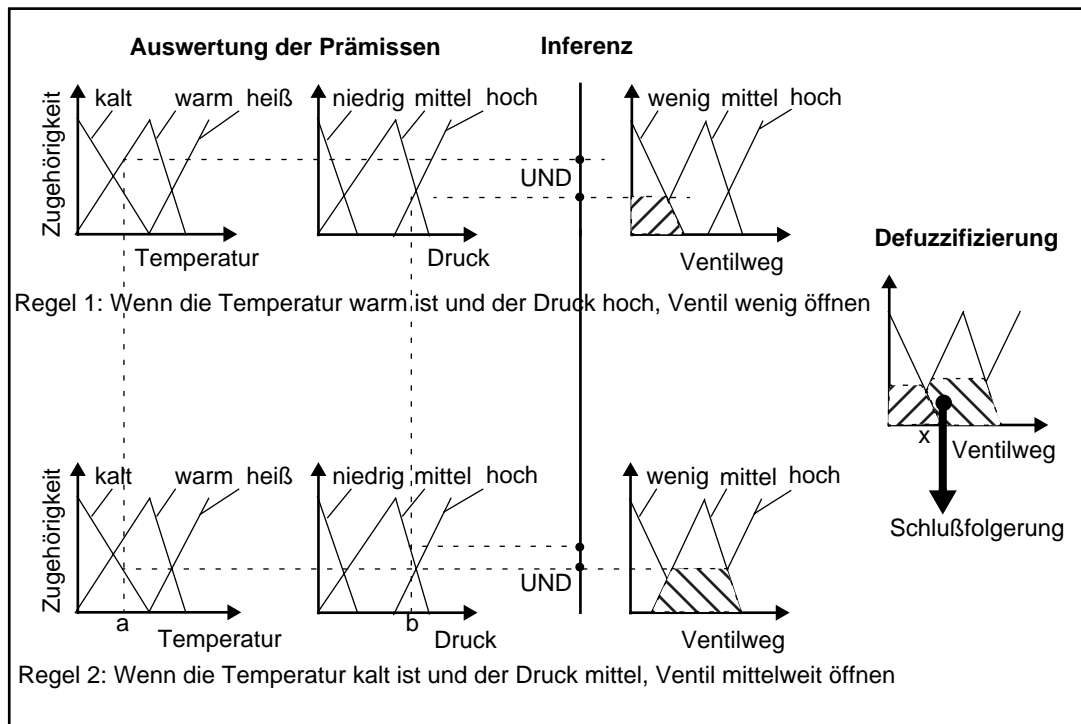


Abbildung 6 Beispiel für einen Fuzzy Formalismus: Als Eingangsgrößen liegen die Temperatur a und der Druck b vor. Die Temperatur ist Element der Fuzzy-Mengen „warm“ und „kalt“, und der Druck b gehört sowohl zu „mittel“ als auch zu „hoch“. Die Regeln 1 und 2, deren Prämissen damit zum Teil erfüllt sind, werden dann ausgewertet. Die UND Verknüpfung ist durch das Minimum umgesetzt. Jede Regel trägt damit in dem Maße zu der Bestimmung der Schlußfolgerung bei, wie ihre schwächere Bedingung erfüllt ist. Am Ende wird aus der vereinigten Ausgangsmenge beider Regeln über einen Defuzzifizierungsformalismus (Schwerpunktbildung) die Schlußfolgerung gezogen, daß ein Ventil um x Einheiten geöffnet werden soll.

Die oben beschriebene Fuzzy-typische unscharfe Formalisierung der Größen, deren Zustand in den Prämissen der Regeln abgefragt wird, hat auch Auswirkungen auf den Inferenzmechanismus. Wegen der fuzzifizierten Eingangsvariablen kann der Fall eintreten, daß eine Regelbedingung nur zu einem gewissen Grad erfüllt ist. Die Regel wird dann bei der Ermittlung der Schlußfolgerung nur teilweise aktiviert (vgl. Abbildung 6). Aus diesem Grund wird der Fuzzy-Inferenzmechanismus auch als „Unscharfes Schließen“ (approximate reasoning) bezeichnet. Während die Fuzzy-Mengentheorie besonders geeignet sein soll, menschliche Klassifizierungsleistungen abzubilden, gilt das unscharfe Schließen als passendes Werkzeug, um menschliche Denk- und Handlungsweisen zu formalisieren.⁹⁹ Die Kennzeichnung der Fuzzy-Inferenz als unscharf ist jedoch irreführend. Durch welche formalen Operationen nämlich die Fuzzy-Regeln umgesetzt werden, ist darin eindeutig und reproduzierbar festge-

⁹⁹ So postuliert etwa Haars (1997, S. 15): „Fuzzy-Logik heißt, die intuitive Vorgehensweise des Menschen bei der Lösung komplexer Probleme durch Computer so weit wie eben möglich nachzuvollziehen.“

legt. Für jede logische Verknüpfung ist ein Operator definiert, der sie in eine Rechenvorschrift umsetzt. Ein weiterer Operator bestimmt, wie die Ergebnisse der Auswertung der einzelnen Regeln zu einer einzigen Schlußfolgerung verknüpft werden. Die abschließende Defuzzifizierung des Ergebnisses der Fuzzy-Inferenz wird ebenfalls nach einem fest definierten mathematischen Algorithmus vorgenommen. Ergebnis der Schlußfolgerung kann, wie Abbildung 6 zeigt, ein exakter Zahlenwert sein. Das „unscharfe Schließen“ ist also nichts Anderes als eine Verkettung mehrerer genau definierter Rechenoperationen. Die „Unschärfe“ entsteht durch die der Fuzzy-Logik eigene graduelle Zuordnung von Variablen zu Mengen.

Beispiel:

Die Regel zum Betrieb einer Waschmaschine: „Wenn das Wasser sehr schmutzig ist, dann soll viel Waschmittel verwendet werden“ könnte auch Teil eines klassischen Expertensystems sein. Fuzzy-typisch ist jedoch die Umsetzung der Bewertungen „sehr schmutzig“ und „viel“ über Zugehörigkeitsfunktionen. Dadurch ist es möglich, daß die Eingangsgröße Wasser zu 0,6 als „sehr schmutzig“ bewertet wird. Die Regel trägt dann nicht mit voller Kraft, sondern nur zu einem Teil zum Inferenzergebnis bei.

Die Frage danach, ob es diese Art der Formalisierung von Bewertungs- und Entscheidungsprozessen tatsächlich ermöglicht, menschliches Vorgehen bei der Verarbeitung von Informationen in mathematische Algorithmen zu überführen, soll hier zunächst nicht auf einer abstrakten Ebene weiterverfolgt werden. Stattdessen werde ich erst in Abschnitt 3.5.7 nach einer konkreten Betrachtung des Einsatzes von Fuzzy-Logik in der Technikentwicklung noch einmal auf die Frage zurückkommen, wie Worte und Zahlen, Technikwissen und Wissenstechnik, sowie Menschliches und Materielles hier unscharf verknüpft sind. Zunächst wird der Überblick über die Thematik jedoch mit einer Zusammenfassung der nötigen Modellierungsschritte und der Nennung einiger wesentlicher Anwendungsfelder fortgeführt.

Schritte fusseliger Übersetzungen

In der Modellierungsphase müssen zur Realisierung der bisher aufgeführten Übersetzungsprozeduren folgende Schritte stattfinden: Auswahl der Eingangs- und Ausgangsgrößen, Bestimmung der diese beschreibenden linguistischen Terme, Festlegung von Anzahl, Lage und Form der Zugehörigkeitsfunktionen, Bildung der Regelbasis und die Auswahl der Inferenz-Operatoren sowie des Defuzzifizierungsverfahrens. Die Validierung (d.h. eine Überprüfung der Gültigkeit für den Anwendungsbereich) von Fuzzy-Modellen kann nur über das Durchspielen von repräsentativen Fällen am Computer – also durch Simulation – geschehen. Es ist kein mathematisch geschlossener modellbasierter Stabilitätsnachweis möglich.¹⁰⁰ Häufig schließt sich an die erste Modellierung ein langwieriger Trial-and-Error Prozeß zur Feineinstellung des Modells an. Soll der entwickelte Algorithmus zur Steuerung eines technischen Gerätes in einen Chip programmiert werden, sind weitere Anpassungen notwendig.¹⁰¹

¹⁰⁰ Ein Stabilitätsnachweis zeigt mathematisch zwingend, daß die Aktionen der Regelungseinheit eines technischen Geräts in keinem Fall zu einer Instabilität des Systems (z. B. Aufschwingen) führen kann. Für Regler, die auf fundamentalen mathematischen Modellen beruhen, ist ein solcher Nachweis meistens möglich. Für Fuzzy-Modelle gibt es nur sehr rudimentäre Ansätze für einige Spezialfälle. Vgl. hierzu Kahlert (1997, S. 115 ff.).

¹⁰¹ So sind z. B. nicht alle Operatoren für eine Hardware-Implementation geeignet.

3.5.3 Anwendungsfelder fusseliger Übersetzungen

Mit Fuzzy-Logik kann, wie es oben beschrieben wurde, Wissen, das in der Form sprachlich gefaßter Regeln vorliegt, in mathematische Algorithmen übersetzt werden. Für ingenieurwissenschaftliche Anwendungen wird diese Möglichkeit interessant, wenn es sich dabei um Wissen handelt, das für die Behandlung technisch zu verarbeitender Vorgänge relevant ist. Das kann Erfahrung im Bereich von Alltagsverrichtungen sein, die durch technische Geräte ersetzt oder unterstützt werden sollen, wie etwa das Waschen von Textilien oder das Heizen von Räumen. Aber auch Wissen um den Umgang mit komplexen technischen Anlagen, das Bedienpersonal durch langjährige Praxis erworben hat, steht häufig im Mittelpunkt des Formalisierungs-Interesses. In ersterem Fall handelt es sich um Wissen über Vorgehensweisen zur Umsetzung von subjektiven Zielvorstellungen, im zweiten Fall geht es um Wissen über Möglichkeiten zur Beeinflussung eines Prozesses zur Erreichung vorgegebener Ziele. Diese Breite an möglichen Wissensverarbeitungen spiegelt sich in der Fuzzy-Produktpalette wieder. Viele Anwendungen sind im Konsumbereich angesiedelt, wo mit Hilfe von Fuzzy-Logik „intelligente“ Geräte entwickelt werden. Bei dem Großteil dieser Anwendungen handelt es sich um Artefakte, in denen mit Fuzzy-Logik wesentlich ausgeklügeltere Steuerungsstrategien als mit konventionellen Methoden realisiert sind. Beispiele sind Steuerungen des Autofokus von Kameras (Isphording 1991), Eliminierung des Handzitterns bei Videokameras (Ross 1995, S. 501), Waschmaschinen, die aus einer Analyse der Art und Stärke der Verschmutzung der Wäsche das Waschprogramm herleiten, sowie ein Staubsauger, der seine Saugleistung dem Untergrund anpaßt (Teraï u. a. 1992).¹⁰² Des weiteren gibt es Produkte, die dem individuellen Verhalten seiner Nutzer angepaßt sind. Beispiele dafür sind der Fuzzy-Kühlschrank, der sich merkt, wie oft sein Benutzer die Tür öffnet und entsprechendes Kühlverhalten an den Tag legt (Kosko 1993, S. 332), sowie eine Heizkessel-Steuerung, die ein Haus nach den Bedürfnissen der Bewohner heizt (Ross 1995, S. 504 ff.). Solche individuell angepaßten Produkte sind jedoch meistens keine reinen Fuzzy-Anwendungen. Stattdessen handelt es sich um Kombinationen mit Künstlichen-Neuronalen-Netzwerken, die das „Lernen“ ermöglichen. Gebrauchstechnologie mit Fuzzy-Chips hat vor allem die japanische Industrie in großer Zahl auf den Markt gebracht und damit bei anderen Industrienationen für Verblüffung gesorgt.¹⁰³

Der zweite große Anwendungsbereich von Fuzzy-Logik ist die elektronische Regelung komplexer technischer Anlagen. Der erste kommerzielle Einsatz von Fuzzy-

¹⁰² Eine stattliche Liste von Fuzzy-Produkten aus Japan und Südkorea mit Angabe der Herstellerfirma (allerdings ohne Quellenangabe) findet sich bei Kosko (1993, S. 330).

¹⁰³ Das von Zadeh 1965 entwickelte Konzept der Fuzzy-Mengentheorie, wurde lange Zeit kaum rezipiert und z.T. sehr heftig angegriffen. Industrielle Anwendungen wurden in nennenswerter Zahl erst 20 Jahre später und dann zunächst fast ausschließlich in Japan entwickelt. Diese wurden vor allem in den USA, aber teilweise auch in Europa als werbewirksame Spielzeuge belächelt. Nach dem enormen Erfolg zahlreicher japanischer Fuzzy-Produkte kam jedoch Panik auf, den Anschluß zu verpassen. Dies bezeugt eine Flut mahnender Artikel in einschlägigen Fachzeitschriften wie z. B.: „Verschläft Europa wieder eine neue high-tech Chance?“ (Post, 1991). In Deutschland gab es schon recht früh Fuzzy-Forschungsprojekte (z. B. an der TH Aachen und an der Universität Dortmund). Für die anfängliche Ablehnung von Fuzzy-Logik werden sehr verschiedene Gründe genannt. Häufig wird angeführt, Fuzzy-Logik käme dem östlichen Denken entgegen und widerspräche westlichem Ordnungsbedürfnis. Weiter werden der geringe Grad der Mathematisierung, der als Gradmesser für Wissenschaftlichkeit gilt, sowie die verblüffende Einfachheit vieler Anwendungen, der viele gestandene Ingenieure nicht über den Weg trauten, als Mankos der Fuzzy-Technologie angegeben. In jedem Fall dürften Auseinandersetzungen verschiedener Fachdisziplinen um Zuständigkeiten eine Rolle gespielt haben.

Logik zum Betrieb einer solchen Anlage diene der Steuerung eines Zement-Drehofens.¹⁰⁴ Besonderes Aufsehen erregte ein auf Fuzzy-Modellierung beruhendes automatisches Zug-Betriebssystem (ATO Automatic Train Operation) der Untergrundbahn in der japanischen Stadt Sendai. Das System steuert die Bahn so genau, daß diese vollkommen ruckfrei gebremst und angefahren wird.¹⁰⁵

Das gemeinsame Kennzeichen dieser verschiedenartigen Anwendungen ist es, daß im Gegensatz zu der analytischen Modellierung nicht versucht wird, die beteiligten Prozesse, also etwa den Waschvorgang oder die Abläufe in dem Zementofen, in ihren inneren Wirkungszusammenhängen, zu erfassen. Statt daher bei der Formalisierung von naturwissenschaftlichen Gesetzmäßigkeiten auszugehen, wird lediglich das von außen beobachtbare Verhalten formalisiert. Ein Grund für ein solches Vorgehen kann es sein, daß wegen der Komplexität der Vorgänge nicht bekannt ist, nach welchen physikalischen Gesetzmäßigkeiten diese ablaufen. Für solche Prozesse ist aber häufig Erfahrungswissen verfügbar, das – z. B. von dem Bedienungspersonal einer technischen Anlage – durch eine langfristige Beobachtung des Systems gewonnen wurde. Solches Wissen bezieht sich jedoch nicht auf die Abläufe im Inneren der Systeme, sondern auf die Handhabung der betreffenden Vorgänge. Eine typische solche Erfahrungsregel wäre etwa: „Wenn die Schmelze kirschrot aussieht, muß die Sauerstoffzufuhr gedrosselt werden“. Es liegt nahe, daß bei der Formalisierung eines solchen Wissens nicht erst ein Modell des Prozeßverhaltens entwickelt, sondern gleich die erfahrungsbasierte Kontrollstrategie nachgebildet wird. Die Regeln in der Regelbasis beschreiben dann nicht, wie sich das System unter bestimmten Einwirkungen verhält, sondern geben an, wie auf Systemzustände reagiert werden soll.¹⁰⁶ Solche Anwendungen werden als Fuzzy-Control bezeichnet. Aus diesem Bereich stammen die meisten technischen Anwendungen der Fuzzy-Logik. Ein Ziel bei der Implementierung von Fuzzy-Control in technischen Anlagen ist häufig, daß erfahrenes und damit teures Bedienpersonal durch Fuzzy-Regler¹⁰⁷ ersetzt werden kann. Die automatisierte Erfahrungsanwendung weist außerdem die üblichen Vorteile der Automatisierung wie schwankungsfreie Funktion und unbegrenzte Einsatzzeiten auf. Im Gegensatz zu einem klassischen Expertensystem, das mit seinen Ergebnissen die Experten bei der Entscheidungsfindung unterstützt, ist bei einem Fuzzy-Expertensystem¹⁰⁸ die Automatisierung um das letzte Glied erweitert. Nicht der Bediener, sondern der Fuzzy-Regler trifft die „Entscheidung“ über die zu ergreifenden Maßnahmen. Wie bei jeder

104 Holmblad/Østergard (1982).

105 Vgl. Yasunobo/Miyamoto (1985). Das Steuerungsprinzip ist hier komplizierter als bei der beschriebenen klassischen Fuzzy-Steuerung, wie sie z. B. bei dem Zementofen angewendet wurde. Es handelt sich bei dem ATO um eine vorrausschauende Regelung (predictive control). Dabei werden die Auswirkungen jeder Steuerungsaktion im Hinblick auf mehrere Gütekriterien (Sicherheit, Fahrkomfort, Fahrzeit, Energieverbrauch, Abweichung des Haltepunktes der Bahn) über die Fuzzy-Inferenz bewertet und aus dieser Bewertung wird die endgültige Steuerungsaktion abgeleitet.

106 Ich bezeichne solche Konstrukte, die nicht ein isoliertes Prozeßverhalten, sondern den Umgang mit demselben nachbilden, im folgenden ebenfalls als Modelle, um deutlich zu machen, daß hier implizit ein Modell über das Verhalten des Systems enthalten ist. Dies ist gegenüber der bisher behandelten Modellierung dynamischer Systeme eine Ausweitung des Begriffs und auch für den ingenieurwissenschaftlichen Sprachgebrauch eher ungewöhnlich.

107 Als Regler wird eine Einheit bezeichnet, die innerhalb eines technischen Gerätes folgende Funktion erfüllt: Vergleich des Systemzustandes mit einem Sollzustand und Eingriff in das System in Abhängigkeit von der festgestellten Differenz, um den Zustand in einer gewünschten Richtung zu verändern. Für Fuzzy-Regler ist die englische Bezeichnung Fuzzy-Controller auch im deutschen Sprachraum üblich.

Automatisierung einer Steuerung muß auch bei der Implementierung von Fuzzy-Control entschieden werden, welche Ziele die automatisierte Steuerung bei der Bedienung des technischen Systems erreichen soll. Die Kriterien für eine solche „Optimierung“ von Steuerungskonzepten technischer Systeme, seien es nun Haushaltsgeräte oder Zementmühlen müssen von außen vorgegeben werden.¹⁰⁹ Diese müssen, wie noch ausführlich gezeigt werden wird, keinesfalls denjenigen der ersetzten menschlichen Bediener entsprechen. Nach der Automatisierung wird das technische Artefakt starr nach den Algorithmen des Fuzzy-Reglers betrieben, die wiederum auf das Erreichen der Optimierungskriterien zugeschnitten sind.

Im Mittelpunkt der folgenden Untersuchungen wird die Fuzzy-Control stehen, da die große Mehrheit der ingenieurwissenschaftliche Fuzzy-Anwendungen in diese Kategorie fällt. Dagegen wird auf die explizit als Fuzzy-Expertensysteme bezeichneten Anwendungen nicht eingegangen, da diese eher im Bereich der Informatik angesiedelt sind.¹¹⁰

3.5.4 Erste Zusammenfassung und Gang der Untersuchung

Die Ergebnisse dieser ersten Annäherung an die fusselige Technologieentwicklung sollen noch einmal kurz zusammengefaßt werden.

Mittels Fuzzy-Logik ist es möglich, bestimmte Formen von sprachlich gefaßten Aussagen in eine Kette von Rechenoperationen umzuwandeln. Charakteristisch ist dabei die auf der Fuzzy-Mengentheorie beruhende unscharfe Formalisierung von Aussagen über Eigenschaften von Objekten. Fuzzy-Modellierung richtet sich in den meisten technischen Anwendungen direkt auf den Zusammenhang zwischen Systemzustand und der angemessenen Reaktion darauf (Fuzzy-Control). Damit wird Wissen über das Verhalten von Prozessen formalisiert, ohne daß die inneren Wirkungszusammenhänge erfaßt werden. Diese Möglichkeit findet sich in den Produkten einerseits in ausgeklügelten Steuerungskonzepten für Gebrauchstechnologien, andererseits aber auch in der automatischen Regelung komplexer technischer Anlagen wieder.

Im folgenden werden einige Fragestellungen, die sich im Zusammenhang mit der Fuzzy-Modellierung als Instrument der Technikentwicklung stellen, weiterverfolgt. Zunächst wird untersucht, ob durch die Formalisierungsmöglichkeiten der Fuzzy-Logik neue Bereiche von Welt für technologisch motivierte Umformungen erschlossen werden. Dann werden die beiden wesentlichen Anwendungsbereiche von Fuzzy-

108 Diese Bezeichnung ist nicht üblich, wahrscheinlich vor allem deswegen, weil zwischen den Betreibern der klassischen KI und den Fuzzy-Vertretern erhebliche Animositäten herrschen. Im Prinzip kann ein Fuzzy-Regler aber durchaus als Expertensystem aufgefaßt werden, da er formalisiertes Wissen automatisch anwendet. Allerdings sind die Experten bei den betroffenen Systemen eben nicht hochdotierte Mediziner oder Börsenmaklerinnen, sondern einfache Maschinenführer. Möglicherweise ist auch das ein Grund, warum sich die Bezeichnung nicht durchgesetzt hat.

109 Ein Beispiel für eine solche Fuzzy-gestützte Optimierung ist die Automatisierung der Petrochemischen Anlage, die von Lu u. a. (1997) geschildert wird. Die Autoren beschreiben hier, daß sie aus einer Vielzahl möglicher Optimierungskriterien die maximale Benzinproduktion ausgewählt haben. Sie weisen darauf hin, daß die Wahl des Optimierungskriteriums von der Philosophie des Anlagenbetreibers abhängt und daß diese sich je nach Kontext so z. B. zwischen den USA und Europa unterscheidet (ebd., S. 7). Solche bewußten Differenzierungen sind jedoch die Ausnahme. In der Regel wird ein Optimierungskriterium ohne weitere Begründung angegeben.

110 Anwendungen von Fuzzy-KI sind z. B. medizinische Diagnosesysteme, Börsenbeobachtung, Spracherkennungssysteme und Bilderkennung. Eine Einführung in diesen Zweig der Fuzzy-Forschung geben Kruse u. a. (1995).

Logik näher beschrieben, um charakteristische Merkmale für Fuzzy-gestützte Technikentwicklung herausarbeiten zu können. Daran anschließend wird erörtert, ob Fuzzy-Technologie tatsächlich von der Verarbeitung menschlicher Denk- und Handlungsweisen geprägt ist und wie die fusselige Modellierungsmethodik bestehende Wissensbestände neu strukturiert. Dabei wird vor allem auf das formalisierte Wissen aber auch kurz auf das Wissen der Modellierer selbst eingegangen. In Abschnitt 3.5.9 wird eine eigene These darüber vorgestellt, was die Wirksamkeit des Fuzzy-Instrumentes ausmacht. Im letzten Abschnitt wird gefragt, wie sich mit den Eigenschaften von Fuzzy-Technologie spezifische soziotechnische Strukturen ausprägen.

3.5.5 Reichen fusselige Regeln weiter als naturwissenschaftliche Formeln?

Es scheint angesichts der Fülle neuer technischer Lösungen, die auf Fuzzy-Modellen beruhen, zunächst offensichtlich, daß sich der Kreis formalisierbarer Vorgänge mit dem Einzug von Fuzzy-Logik in die ingenieurwissenschaftliche Modellierung erheblich erweitert. Bei näherer Betrachtung der Anwendung von Fuzzy-Logik in der Technikentwicklung muß diese Aussage jedoch eingeschränkt werden. Für eine große Zahl der Fälle, in denen Fuzzy-Logik zur Formalisierung von Weltausschnitten eingesetzt wurde gilt, daß eine analytische mathematische Modellierung zwar prinzipiell möglich wäre, aber aus Zeit- oder Kostengründen nicht praktikabel ist. Dies trifft vor allem für Fuzzy-Control Anwendungen zu, denn Regeleinheiten, die fest in ein technisches Artefakt eingebaut sind, müssen in Echtzeit auf die Veränderungen des Systemzustandes reagieren. Die Auswertung eines physikalischen Modells und insbesondere die numerische Integration einer nichtlinearen Differentialgleichung würde dafür zu lange dauern.¹¹¹ Wegen seiner einfachen Struktur kann ein Fuzzy-Inferenz-Algorithmus dagegen sehr schnell abgearbeitet werden. Hier wird also nicht die Formalisierung an sich, sondern mit der Echtzeit Automatisierung eine bestimmte Einsatzweise formaler Modelle durch die Anwendung der Fuzzy-Logik ermöglicht. Ein weiterer Zeitfaktor macht sich in der Entwicklung technischer Artefakte bemerkbar. Fuzzy-Modellierung ist im Vergleich mit physikalischer Modellierung schnell und einfach. In einer relativ kurzen Zeit können mit ihrer Hilfe Prototypen eines neuen Artefaktes entwickelt werden. Dies bedeutet einen wichtigen Zeitgewinn in dem Wettlauf um Marktanteile für neue Produkte. Eine auf Fuzzy-Logik gestützte Formalisierung kann jedoch nicht die gleichen differenzierten Eingriffsmöglichkeiten in den behandelten Wirklichkeitsausschnitt liefern, wie eine analytische Beschreibung. Im Gegensatz etwa zu der FEM-Modellierung gibt sie keine Hinweise darauf, wie ein System möglicherweise anders ausgelegt werden könnte, da sie lediglich den erfolgreichen Umgang mit bestehenden Strukturen formalisiert. Die Möglichkeit mit Fuzzy-Logik eine „optimale“ statt einer „exakten“ Lösung zu finden und damit Zeit und

¹¹¹ Ein Beispiel für einen solchen Fall ist die Steuerung eines chemischen Prozesses in einer Ölraffinerie, die von Lu u. a. (1997) beschrieben wird. Dieser Vorgang ist hochgradig nichtlinear und verändert mit der Zeit seine charakteristischen Größen. Laut Lu u. a. gibt es für den Prozeß zwar mathematische Modelle, diese sind aber zu kompliziert, um als Grundlage für eine Echtzeit-Optimierung dienen zu können. Ähnliches gilt für den schon erwähnten Zementofen (vgl. Holmblad, Østergard 1982). Ein weiteres Beispiel findet sich bei Meincke (1996): Hier wird mit der Hilfe von Fuzzy-Logik eine Abschätzung des Schwingungsverhaltens von Getrieben durchgeführt. Die Daten, aus denen das Fuzzy-Modell gebildet wurde, stammen aus einem mathematischen Modell des Schwingungsverhaltens. Eine solche Berechnung für jede mögliche Getriebeausführung durchzuführen, ist jedoch zu aufwendig. Daher wird mit der Fuzzy-Abschätzung vorlieb genommen.

Kosten zu sparen, wird von sehr vielen Fuzzy-Theoretikern hervorgehoben. So spricht z. B. Ross (1995, S. 5) davon, daß die Präzision von Fuzzy-Modellen für viele „menschliche Probleme“ (human problems) ausreiche. Menschliche Probleme, die eine Toleranz gegenüber einer solchen Ungenauigkeit zulassen, treten für Ross vor allem in alltäglichen Zusammenhängen, wie im Autoverkehr oder im Haushalt auf. So nennt er als Beispiele etwa das Einparken eines Autos und das Waschen von Kleidung. Ross appelliert an Ingenieure und Forscher, in solchen Anwendungsfällen, die Möglichkeit Fuzzy-Methoden einzusetzen und damit Ungenauigkeit zuzulassen, auszuloten und so Kosten zu sparen. Es ist offensichtlich, daß dieser Begriff von „menschlich“ von den sozialen Rahmenbedingungen, die den Einsatz der betreffenden Technologien strukturieren, geprägt ist und sich nicht zwingend auf spezifische Eigenschaften der physikalischen Prozesse, die verarbeitet werden sollen, zurückführen läßt. So ist es zwar zweifellos der Fall, daß eine Beschreibung aller physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die in einem Prozeß involviert sind, einen umso höheren Aufwand erfordert, je komplexer ein Prozeß ist. Ob dieser Aufwand jedoch in Kauf genommen wird, hängt davon ab, ob durch ein gezieltes Ausnutzen dieser Gesetzmäßigkeiten Gewinne erzielt werden können, die den Einsatz übertreffen. So wäre es z. B. unrentabel, die physikalischen und chemischen Abläufe innerhalb eines Waschgangs in einer Waschmaschine mathematisch zu modellieren, um daraus etwa die optimale Temperatur oder die Waschmittelmenge herzuleiten. Die Waschmaschine würde dadurch viel zu teuer und wahrscheinlich auch zu langsam. Aus diesem Grund reicht es hier aus, wenn das Modell des Vorgangs, auf dem das Artefakt beruht, der Genauigkeit entspricht, mit der eine Nutzerin es beobachtet und bedient. Die Vielzahl der Einsatzformen und Betriebsbedingungen von „Alltagstechnik“ ist ein weiteres Hindernis für eine analytische, naturwissenschaftlich basierte Modellierung, da die Randbedingungen für ein physikalisch mathematisches Modell genau festgelegt sein müssen. Das heißt aber nicht, daß eine solche Vorgehensweise prinzipiell unmöglich ist. Für einen industriell genutzten Waschprozeß könnte es durchaus sein, daß eine naturwissenschaftlich basierte mathematische Modellierung in Angriff genommen wird. Allerdings müßte dazu wiederum der Prozeß selbst verändert, d. h. vor allem standardisiert, werden. Die Eigenschaften des Gegenstandes sind hier ganz offensichtlich nicht der wesentliche Faktor bei der Wahl der Formalisierungsmethode. Vielmehr strukturiert die gesellschaftliche Organisation des Technikeinsatzes, wie etwa die Trennung in Konsumbereich und industrielle Produktion oder die Vielzahl der Einzelhaushalte, die zu formalisierenden Ausschnitte von Welt auf eine Weise, die Wahl der Methode der technologischen Verarbeitung in hohem Maße determiniert.¹¹² Die Formalisierungsweise wiederum erfordert spezifische Umformungen der behandelten Wirklichkeitsausschnitte und determiniert die möglichen Umgangsweisen mit den entwickelten technischen Systemen. Diese Rückwirkung wird für Fuzzy-Modellierungen an anderer Stelle (Abschnitt 3.5.12) untersucht. Auf die Frage nach der Erweiterung des Einzugsbereichs technologisch motivierter Formalisierung kann jedoch zunächst folgendes festgehalten werden:

¹¹² Gerade für den Bereich der Haushaltstechnologie, die ja ein bevorzugter Gegenstand fusseliger Menschlichkeit ist, haben zahlreiche Studien gezeigt, daß die Richtung der technischen Entwicklung hochgradig von gesellschaftlichen Strukturierungen und dabei vor allem von der Machtverteilung zwischen den Geschlechtern geprägt ist. Vgl. hierzu z. B. Wajcman (1994, Kapitel 4).

Fuzzy-Modellierung ist ein Werkzeug, das es ermöglicht, auch solche Vorgänge zu formalisieren, für die dies auf andere Weise innerhalb der bestehenden gesellschaftlichen Organisation von Techniknutzung und Technikentwicklung nicht rentabel und praktisch durchführbar wäre. Die günstigen Eigenschaften von Fuzzy-Control Konzepten ermöglichen die Automatisierung einer Vielzahl von technischen Systemen, die zuvor ohne intelligente Steuerungskonzepte auskommen mußten. Das ist zwar keine prinzipielle, aber dennoch eine folgenreiche Ausweitung der technologisch motivierten Formalisierungen von Weltausschnitten. Indem eine praktisch auswertbare Formalisierung für immer mehr Bereiche technischer Systeme möglich wird, vergrößert sich der Anteil soziotechnischer Systeme, der zu Zwecken der Formalisierung bestimmten Strukturierungen unterworfen wird.

Als nächstes stellt sich nun die Frage wie der Zusammenhang zwischen Formalisierungsmethodik, modelliertem Wirklichkeitsausschnitt und den entwickelten Artefakten beschaffen ist. Daher sollen jetzt die beiden wesentlichen Anwendungsbereiche der Fuzzy-Control genauer betrachtet werden. Das sind zum Einen die Produktion intelligenter Artefakte des Alltagsgebrauchs, zum Anderen die Modellierung von menschlicher Erfahrung und Intuition im Umgang mit komplexen technischen Prozessen.

3.5.6 Eigenschaften fusseliger Artefakte

3.5.6.1 Intelligente Geräte im Alltag

Als „intelligent“ werden technische Artefakte bezeichnet, die nicht stur nach einem festen Ablaufschema funktionieren, sondern ihr Verhalten an die jeweilige Situation anpassen. Das kann bedeuten, daß die lokalen Einsatzbedingungen überprüft und einbezogen werden oder daß das Verhalten an das Bedürfnis von Nutzerinnen und Nutzern angepaßt wird. Fuzzy-Logik ermöglicht die Implementierung intelligenter Steuerungskonzepte in viele Artefakte des alltäglichen Gebrauchs. Typische Beispiele für solche Produkte sind der Fuzzy-Staubsauger und der Fuzzy-Reiskocher. Der Staubsauger saugt nicht einfach drauflos, sondern paßt sich dem Untergrund in seiner Saugleistung an. Während bei einem tiefen Teppich stark gesaugt wird, wird bei der Tatami Matte nur sanfte Kraft benötigt. Um welchen Untergrund es sich handelt, erkennt ein eingebauter Staub-Sensor. In dem Reiskocher sorgt ein Fuzzy-Inferenz Chip, in dem das Wissen von „Experten des Reiskochens“ implementiert ist, dafür, daß unabhängig von der Menge an Reis immer die gewählte Reisqualität (hart oder weich) erreicht wird.¹¹³ Solche angenehmen Eigenschaften sind es offensichtlich, die Fuzzy-Produkte menschenfreundlich machen, wie es der Name des Tagungsbandes „Fuzzy Engineering toward Human Friendly Systems“ (Terano u. a. 1992) ausdrückt. Wie können nun solche „menschenfreundlichen“ Strategien mit Fuzzy-Konzepten umgesetzt werden?

Zunächst ist festzustellen, daß die „Intelligenz“ von Artefakten eng mit der eingesetzten Sensortechnik verknüpft ist. Der Einsatz hochentwickelter Sensoren zur Messung der verarbeitenden Größen, ist eine unabdingbare Voraussetzung für jede intelligente Gerätesteuerung. Viele der unter dem Fuzzy Etikett vertriebenen neuen technischen Lösungen beruhen vor allem auf verbesserter Sensortechnik. Allerdings ist es ein spe-

¹¹³ Beide Beispiele waren Demonstrationen bei der Konferenz IFES (International Fuzzy Engineering Symposium) '91 (Terano u. a. 1992).

zifischer Vorteil von Fuzzy-Control, daß billige Sensoren eingesetzt werden können, da keine exakten Eingangsdaten benötigt werden. Dies ist ein weiterer Grund dafür, daß mit Fuzzy-Logik gerätetechnische Intelligenz auch für Konsumprodukte bezahlbar wird.

Darüber hinaus finden sich jedoch auch Eigenschaften der Modellierungsmethodik selbst, die eine Entwicklung technischer Systeme, die sich an unterschiedliche Kontexte anpassen können, erleichtern: Da die Regeln, nach denen ein Fuzzy-Gerät gesteuert wird, in sprachlicher Form gefaßt sind, ist es auch für Laien möglich, eine Fuzzy-Regelbasis zu verstehen und zu ergänzen oder abzuändern. Zudem können, wegen des robusten Inferenzverfahrens, einzelne Regeln verändert werden, ohne daß das Gesamtkonzept komplett revidiert werden muß. Es können sogar gleichzeitig sich widersprechende Regeln, also verschiedenartige Konzepte, für die Umgangsweise mit einem Vorgang in einer Regelbasis implementiert sein.¹¹⁴ In manchen Fuzzy-Systemen können die einzelnen Regeln mit Bewertungsfaktoren versehen werden, die dann je nach Nutzerbedürfnis verändert werden.¹¹⁵ Alle diese Möglichkeiten erleichtern die Aufnahme individueller Strategien bei dem Umgang mit den Artefakten. Im Extremfall wäre es denkbar, daß sich eine Nutzerin ihr Artefakt selbst gestaltet, indem sie die Regeln, nach denen es arbeiten soll, eingibt. Darüber hinaus können über die Gestaltung der Zugehörigkeitsfunktionen subjektive Bewertungen formuliert werden. So könnten im Falle einer Temperaturregelung individuelle Bewertungsmaßstäbe für Wärme oder Kälte eingearbeitet werden. Soll ein technisches Gerät auf der Basis anderer Bewertungen arbeiten, etwa weil eine andere Person eine Heizungsanlage benutzt, müßten lediglich die Zugehörigkeitsfunktionen verschoben oder verformt werden. Auf diese Art und Weise können auch lokale Eigenheiten einfach berücksichtigt werden. Diese Stärke der Fuzzy Formalisierung betonen etwa Pedrycz und Gomido (1998, S. xxiii). Sie nennen als Beispiel eine Fuzzy-gesteuerte Ampelschaltung. Eine sinnvolle Kalibrierung der linguistischen Terme macht es ihrer Schilderung nach möglich, das System mit gleicher Regelbasis in den verschiedensten Lokalitäten einzusetzen:

„For example, the term heavy traffic means something different during rush hours in the streets of Sao Paulo than at the crossing in a small town somewhere in the middle of the prairies. The context is of paramount importance and fuzzy sets are ready to cope with this conceptual challenge“

Die gute Anpaßbarkeit an verschiedene Einsatzbedingungen macht die Fuzzy-Logik demnach offensichtlich zu einem prädestinierten Entwicklungswerkzeug für benutzerfreundliche, individuell einstellbare Technologien. So formuliert der Fuzzy-Experte Kosko (1997, S. xx):

„Fuzzy Systems maintain a common rule structure while each user tunes the sets and finds his niche in the conceptual anarchy. This turns the anarchy [„konzeptionelle Anarchie“ vgl. Anmerkung 114, P.W.] into a search space for user friendliness. Each

114 Kosko spricht von einer „konzeptionellen Anarchie“. Kosko (1997 S. xix, Preface). In der Praxis der Fuzzy-Control wird allerdings in der Regel eine konsistente Regelbasis angestrebt. Vgl. hierzu Kahlert (1995, S. 94).

115 Dieses Konzept ist z. B. in dem von Ross (1995, S. 504) beschriebenen Fuzzy-Control System für eine Heizungsanlage realisiert. Die 405 Regeln, nach denen die Anlage betrieben wird, können vom Benutzer mit Bewertungsfaktoren zwischen 0 und 1 versehen werden.

person digs his own niche in the fuzzy state space.“ [State Space – Zustandsraum: Raum der möglichen Konstellationen aller Zustandsgrößen eines Systems, P.W.]

Allerdings finden sich wenige Produkte, in denen die individuelle Anpassung an Nutzerbedürfnisse in der Betriebsphase tatsächlich verwirklicht ist. In den allermeisten Fällen werden die geschilderten Eingriffsmöglichkeiten lediglich in der Entwicklungsphase des Gerätes von den Entwicklungsingenieuren genutzt. In dem fertigen Produkt jedoch ist die Fuzzy-Control Strategie fest installiert. Die Intelligenz ist sozusagen eingefroren. Bei solchen Produkten scheint es fraglich, ob die Nutzer gegenüber dem Artefakt an Kompetenzen verlieren oder gewinnen.¹¹⁶

Anders liegt der Fall bei den sogenannten „adaptiven“ Fuzzy-Systemen. Hier wird ein Fuzzy-Modell während des Betriebs automatisch überprüft und verstellt¹¹⁷, so daß stets eine Rückkoppelung zu den Umgebungsbedingungen vorhanden ist. Das Vorgehen ist dabei analog zu dem der klassischen adaptiven Modellierung: Während des Betriebs werden die Ergebnisse des Modells laufend mit den Meßwerten aus der Anlage verglichen. Die Regelverstellung erfolgt in Abhängigkeit von dem Ergebnis dieses Vergleichs nach einem vorgegebenen Algorithmus. Dabei kann allerdings von einer Transparenz der Regelstrategie für Laien nicht mehr die Rede sein. Zudem benötigen solche Anwendungen einen sehr hohen meßtechnischen Aufwand.

Eine weitere Möglichkeit, während des Betriebs noch Anpassungen der Steuerungskonzepte vorzunehmen, ist die Kombination des Fuzzy-Formalismus mit konnektionistischen Systemen. Diese können das Nutzerverhalten oder die spezifischen Umgebungsbedingungen „lernen“ und danach das Fuzzy-Modell verändern. Dies wird z. B. für den Fuzzy-Kühlschrank von Sharp als Zukunftsvision angegeben (Kosko 1997, S. 16). Dieser soll „lernen“ wie oft der Benutzer die Tür öffnet und sein Kühlverhalten darauf einrichten. Solche Strategien setzen jedoch auf eine „Vermessung“ des Benutzers und nicht auf eine Einbeziehung seines bewußten Wissens. Der Nutzerzugriff auf die Gerätesteuerung scheint also im wesentlichen eine theoretische Möglichkeit zu bleiben.

3.5.6.2 Komplexe Prozesse und großtechnische Anlagen

Als das zweite große Anwendungsfeld von Fuzzy-Logik in der Technikentwicklung war oben die Modellierung großer technischer Anlagen genannt worden. In solchen Anlagen laufen häufig äußerst komplexe Prozesse ab, deren naturwissenschaftliche Beschreibung nach heutigem Wissensstand unmöglich erscheint. Mit der Hilfe der Fuzzy-Logik soll jedoch menschliche Erfahrung und Intuition im Umgang mit diesen Anlagen zur Modellierung genutzt werden. Hier geht es nicht primär um „menschliche“ Genauigkeit und auch nicht um „menschenfreundliche“ Funktion von Geräten, sondern um menschliche Umgangsweisen mit Welt als Ressource für deren technische Verarbeitung. Ross (1995) bezeichnet solche Ansätze als Modellierungen „nicht-zufälliger Unsicherheit“. Diese Bezeichnung grenzt solche Vorgänge von

¹¹⁶ In diese Richtung gehen Bedenken gegen die Einführung japanischer Fuzzy-automatisierter Konsumprodukte in Amerika. In Bezug auf eine Fuzzy-Waschmaschine mit Ein-Knopf-Automatik, die den Waschvorgang selbst gestaltet, meint z. B. ein Elektronik Entwicklungsingenieur von General Electrics: „Die Amerikaner scheinen nach dem Motto ‘je mehr Knöpfe desto besser’ zu leben. Wenn sie 800 Dollar ausgeben, möchten die Leute auch tun können, was sie wollen, selbst wenn es falsch ist.“ zitiert nach Mc Neill/Freiberger (1996, S. 394).

¹¹⁷ Es können z. B. die Zugehörigkeitsfunktionen oder die Regelbasis verändert werden (letzteres etwa bei Lu u. a. (1997)).

Zufallsprozessen ab, die mit wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansätzen behandelt werden.¹¹⁸ Nichtzufällige Unsicherheit besteht z. B. aufgrund vager Informationen oder mangelnder Beobachtbarkeit. Auch die Beteiligung menschlichen Ermessens fällt darunter. Fast alle in der Technikentwicklung relevanten Prozesse sind mit solchen Unsicherheiten behaftet. Bei der physikalisch mathematischen Modellierung wird damit umgegangen, indem Idealisierungen und Annäherungen in das Modell eingebaut werden oder indem auf phänomenologische Modellanteile zurückgegriffen wird (vgl. Abschnitt 3.4). Dieses Vorgehen erfordert jedoch einen umso höheren Aufwand, je vielschichtiger die zu verarbeitenden Vorgänge sind. Probleme, die immer wieder als Gründe für die Unmöglichkeit oder Schwierigkeit einer mathematischen Modellierung genannt werden, sind extreme Nichtlinearitäten, zeitveränderliche Parameter, hohe und stark variierende Zeitkonstanten und Nicht-Beobachtbarkeit.¹¹⁹ Solche Systeme werden jedoch häufig von menschlichem Bedienpersonal erfolgreich gesteuert. Will man diese Prozeßsteuerung automatisieren, muß ein Weg gefunden werden, das aus Erfahrung gewonnene, personengebundene Bedienerwissen in maschinell verwertbare Form zu bringen. Hier kommt Fuzzy-Logik mit ihrer Funktion als Übersetzungswerkzeug von natürlicher Sprache in Zahlen zum Einsatz. Die Übersetzung des Wissens muß in der Entwicklungsphase des Steuerungskonzeptes stattfinden.

Betrachtet man das in der Praxis vorherrschende Vorgehen bei der Entwicklung von Fuzzy-Reglern, so stellt man fest, daß hinsichtlich der Implementierung menschlicher Intuition und Erfahrung ähnliche Einschränkungen wie bei der Einbeziehung des Nutzerwissens gemacht werden müssen. „Echte“ Fuzzy-Anwendungen mit einer expliziten Befragung erfahrener Personen finden sich in der Literatur auffällig wenige. Wenn überhaupt das Verhalten eines menschlichen Bedieners einbezogen wird, so werden dessen Handlungen häufig lediglich meßtechnisch aufgezeichnet und dann mathematisch analysiert.¹²⁰ In anderen Fällen wieder werden die sprachlichen Formulierungen durch die Entwicklungsingenieure vorgenommen. Diese dienen dann meistens nur als grober Einstieg in die Reglerauslegung. In den meisten Anwendungen werden jedoch zur Fuzzifizierung und auch zur Generierung der Regelbasis automatische Algorithmen eingesetzt, ohne daß überhaupt von einer sprachlichen Fassung der Variablen und Regeln ausgegangen wird. Dazu werden Meßdaten aus dem Prozeß analysiert und daraus über ausgeklügelte Verfahren der Datenanalyse die Regeln gefunden, mit denen Ein- und Ausgangsgrößen verknüpft sind. In diese Richtung weist auch die ver-

118 Unter den Wahrscheinlichkeitstheoretikern finden sich die heftigsten Gegner der Fuzzy-Logik. Sie beanspruchen für die Wahrscheinlichkeitstheorie, mit jeder Art von Unsicherheit umgehen zu können. Die Fuzzy-Theoretiker weisen dies jedoch zurück und unterscheiden zwischen verschiedenen Arten von Unsicherheit. Die Wahrscheinlichkeitstheorie behandelt ihrer Meinung nach nur einen kleinen Ausschnitt möglicher Unsicherheiten, nämlich solche, die auf Zufälligkeiten beruhen. Ein komplexes physikalisches System ist jedoch, auch wenn es nicht exakt mathematisch beschreibbar ist, nicht zufällig in seinem Verhalten (vgl. Ross 1995, S. 6-15 und Mc Neill/Freiberger 1996, S. 247 ff.).

119 Vgl. etwa Gariglio (1991, S. 63): die „kontinuierlichen, durch heuristische Entscheidungsregeln und vom Menschen gesteuerten Prozesse [...] zeichnen sich durch starke Nichtlinearität aus sowie durch Zeitabhängigkeit der Parameter, Wechselwirkungen und Rückführungen der Steuergrößen untereinander oder durch nicht beobachtbare Meß- und Steuergrößen“ oder Kahlert (1995, S. 66) „Leider lassen sich reale Systeme von den Errungenschaften der linearen Regelungstheorie nur wenig beeindrucken. Nicht nur, daß sie mehr oder weniger gravierende Nichtlinearitäten aufweisen – häufig sind sie auch zeitvariant und/oder weisen verteilte Parameter auf. [...] Hier schlägt die Stunde des Fuzzy-Controllers“.

120 Kahlert (1995, S. 88) beschreibt dieses Vorgehen als „Identifikation des Bedienerverhaltens“.

stärkte Tendenz, Fuzzy-Control mit Künstlichen Neuronalen Netzwerken oder Evolutionären Algorithmen zu kombinieren (Computational Intelligence).¹²¹ Die Regeln und die Zugehörigkeitsfunktionen des Fuzzy-Systems werden dann nicht durch eine Problemanalyse ermittelt, sondern berechnet.¹²² Auch hier wird die Expertin, ebenso wie der Nutzer, vermessen statt befragt, wie folgende Aussage von Bart Kosko (1993, S. 238/9) deutlich illustriert:

*„Wir suchen nach einem lernenden System, das das **Verhalten** von Experten in fuzzige Regeln umsetzt. Fachleute hinterlassen Abdrücke in den Daten, eine Zahlenspur, die das adaptive System in fuzzy-logische Regeln umwandelt, [...]. Das adaptive System saugt gewissermaßen das Gehirn der Fachleute aus. DIRO: 'Data in, rules out' – Daten rein, Regeln kommen raus. Erfahrung rein, heraus kommt gesunder Menschenverstand. Beispiele rein, Fachwissen raus. Ein neuronales Netzwerk kann die Black-Box DIRO füllen.“*

Die Problematik der Wissensakquirierung spielt denn auch eine entsprechend geringe Rolle in der Literatur zu Fuzzy-Control. Eine Auseinandersetzung mit geeigneten Interviewtechniken, um Bewertungen und Handlungsstrategien der befragten Experten erfassen zu können, findet praktisch nicht statt.

Dieser Stand der Dinge ist das Ergebnis einer historischen Entwicklung, die sicherlich nicht zwangsläufig diese Richtung hätte nehmen müssen. Betrachtet man die Entwicklung des Fuzzy-Forschungsfeldes anhand einer Analyse der einschlägigen Veröffentlichungen, so läßt sich eine Abkehr von der Implementierung menschlichen Wissens feststellen. Während sich in früheren Fuzzy-Projekten durchaus Versuche finden, Bedienerwissen durch geduldiges Befragen zu verbalisieren und in den Fuzzy-Formalismus zu übertragen¹²³, gibt es in dieser Richtung praktisch keine neueren Anwendungen.¹²⁴ Die Gründe für diese Entwicklung sind vielschichtig. Allgemeine Tendenzen in der Technikentwicklung, die sich aus gesellschaftlichen Zusammenhängen heraus erklären, korrespondieren mit wissenschaftsinternen Selektions-Mechanismen. So ist es sicherlich ein Faktor, daß mit der Orientierung an verbalisiertem menschlichem Wissen, starke Einschränkungen hinsichtlich der behandelbaren Phänomene einhergehen. Prozesse mit sehr vielen Ein- und Ausgangsgrößen übersteigen schnell das menschliche Fassungsvermögen. Technische Prozesse, wie der immer wieder zitierte Zementdrehofen (Holmblad, Østergard 1982), für den tatsächlich eine Art Handbuch mit Erfahrungsregeln existierte, gibt es nur wenige. Daher führt das

121 Vgl. Haars (1997).

122 Vgl. hierzu Abschnitt 3.6.2.

123 So wurde z. B. bei der schon genannten Zementofensteuerung eigens eine Fuzzy-Programmiersprache entwickelt, da das Bedienerwissen eine höhere Priorität als das Programmiererwissen haben soll (Holmblad/Østergard 1982, S. 394). Auch bei der Kläranlagensteuerung von Yagashita u. a. (1985) werden explizit Bediener befragt. Weiterführende Überlegungen (Einbeziehung der Wassertemperatur) wurden mit den Bedienern offensichtlich abgesprochen. Interessant ist es auch, daß bei der Auswertung der Ergebnisse in diesen frühen Entwicklungen, der Fuzzy-Controller fast immer mit dem Menschen verglichen wird, während heutige Veröffentlichungen Vergleiche mit Nicht-Fuzzy-Expertensystemen (Lu u. a. 1997) oder mit konventionellen Reglern anstellen.

124 Im Engineering Science Abstract (einer Auswahl von Artikeln aus zahlreichen internationalen ingenieurwissenschaftlichen Fachzeitschriften) findet sich für 1999 und 2000 keine einzige wissensorientierte Fuzzy-Anwendung (insgesamt 52 Einträge für Fuzzy-Sets/Fuzzy-Control). Diese Entwicklung hat wohl auch Bart Kosko vor Augen, wenn er seine Sichtweise der Fuzzy-Prinzipien explizit von den früheren linguistischen Ausrichtungen des Feldes absetzt (Kosko 1997, Preface).

Bestreben nach der Formalisierung immer umfangreicherer Systeme bald auf den Weg der automatisierten Regelfindung. Des weiteren ist, wie im folgenden noch ausgeführt werden wird, die Ermittlung menschlichen Wissens ein äußerst mühseliger Vorgang, bei dem der „Wissensingenieur“ stark auf die Kooperation der „Fachleute“ angewiesen ist. Diese Abhängigkeit soll nun aber gerade durch eine Automatisierung der Prozeßsteuerung umgangen werden. Insofern liegt es in der Logik der Sache, wenn von vornherein versucht wird, den wissenden Menschen zu umgehen. Mit diesen grundsätzlichen Ausrichtungen von moderner Technikentwicklung geht es einher, daß Tätigkeiten wie das sprachliche Beschreiben von Phänomenen oder das Befragen von Menschen innerhalb der Ingenieurwissenschaft keinen hohen Stellenwert besitzen und in der Ingenieurausbildung praktisch nicht vorkommen.¹²⁵ Stattdessen wird Ingenieur-„wissenschaftlichkeit“ vielfach an der Verwendung naturwissenschaftlicher Methoden oder mathematischer Verfahren gemessen.

3.5.6.3 Fazit

Zusammenfassend kann nach der Analyse konkreter Technikentwicklung mit Fuzzy-Logik Konzepten festgehalten werden, daß die Fuzzy-Modellierung zwar vom Verfahren her die Einbeziehung vielfältigen Wissens in die Technikentwicklung erleichtert, diese Möglichkeiten jedoch in der Praxis kaum genutzt werden. Stattdessen werden Wege gesucht und gefunden, auf denen eine Fuzzy-Formalisierung auch ohne die explizite Einbeziehung menschlichen Wissens möglich wird. Offensichtlich ist also die Integration menschlichen Wissens kein eigenständiger Zweck der Anwendung von Fuzzy-Control in der Technikentwicklung. Der Aufwand, den seine zumindest partielle Umsetzung in Fuzzy-Konzepte erfordern würde, wird nur in wenigen Fällen getrieben. Stattdessen stehen ökonomische Interessen nach schneller und billiger Formalisierung und der darauf gründenden Automatisierung verschiedener Wirklichkeitsausschnitte im Vordergrund. Hier besteht ein auffälliger Gegensatz zwischen dem rhetorischen Gewand in dem Fuzzy-Logik präsentiert wird und der tatsächlichen Anwendung des Konzeptes.¹²⁶ Dieses Ergebnis wirft die Frage auf, ob der Fuzzy-Formalismus überhaupt dazu geeignet ist, menschliche Denk und Handlungsweisen zu erfassen. Immerhin wäre es ja möglich, daß diese Fähigkeit zwar vorhanden ist, aber ebenso wie die individuellen Anpassungsmöglichkeiten der Fuzzy-Modelle aus verschiedenen Gründen nicht genutzt wird. Daher soll im folgenden dem Verhältnis von Fusseligkeit und menschlichem Denken nachgegangen werden.

3.5.7 Ist Fusseligkeit menschlich?

Wie oben geschildert wurde, wird Fuzzy-Logik zur Formalisierung sprachlich gefaßter Regeln eingesetzt. Aufgrund dieser Fähigkeit zur Umsetzung von Sprachlichkeit wird ihr immer wieder bescheinigt, „menschliche“ Verarbeitungsweisen von Welt besonders gut erfassen zu können. Um diese Zuschreibung zu prüfen, soll daher zunächst genauer untersucht werden, wie Sprache in der Fuzzy-Control verarbeitet

125 Von dieser niedrigen Bewertung sind auch andere Bereiche der Ingenieurstätigkeit, die sich mit sprachlichen Beschreibungen befassen, wie z. B. die Erstellung von Technischer Dokumentation betroffen.

126 Den meisten Fuzzy-Autoren fällt dieser Widerspruch offensichtlich nicht auf. Ausnahmen sind Jörg Kahlert (1997), der an vielen Stellen seines Buches darauf hinweist, daß die geschilderten Vorgehensweisen nur noch wenig mit dem „eigentlichen Sinn“ von Fuzzy-Logik zu tun hätten und Bart Kosko (1997) der den linguistisch orientierten Anspruch von vornherein von sich weist.

wird.¹²⁷ Anschließend wird gefragt, wie menschliche Vorgehensweisen überhaupt in ein Fuzzy-Regelwerk passen können.

An zwei zentralen Stellen der Fuzzy-Formalisierung findet eine Verarbeitung natürlichsprachlich gefaßten menschlichen Wissens statt. Zum Einen werden bei der Fuzzifizierung Beschreibungen von Systemzuständen durch Zuweisungen von linguistischen Termen vorgenommen. Zum Anderen werden in der Regelbasis menschliche Handlungsstrategien in sprachlicher Form niedergelegt. Aus der Vielfalt möglicher Funktionen von Sprache sind es somit zwei, die mit Fuzzy-Logik modelliert werden, nämlich Regeln über Handlungsabläufe und Klassifizierungen von Zuständen durch Zuordnung von Eigenschaften. Was nun die Klassifizierung von Gegenständen betrifft, so scheint es in der Tat so, als sei das Konzept der Fuzzy-Mengen geeignet, um hier das menschliche Vorgehen nachzubilden. Die Möglichkeit, Zugehörigkeiten zu Klassen in abgestufter Form anzugeben, kommt dem Alltagsverständnis entgegen und entspricht der Vagheit, mit der in natürlicher Sprache Dinge mit Eigenschaften belegt werden. Zudem gibt es hier relativ plausible Methoden, die gebräuchlichen Klassifizierungen zu ermitteln. So können z. B. den Wissensträgern Beispiele für Zustände vorgeführt werden, die diese dann auf einer Skala dem entsprechenden Adjektiv zuordnen. Auf diese Weise kann Punkt für Punkt die Zugehörigkeitsfunktion ermittelt werden. In dieser Hinsicht kann man also den Vertretern der These von der fusseligen Menschlichkeit darin folgen, daß hier eine Annäherung an natürlichsprachige Klassifizierungsweisen möglich ist. Diese eng begrenzten Möglichkeiten zur Sprachmodellierung sind jedoch in keiner Weise geeignet, natürliche Sprache komplett in Algorithmen zu überführen. Darüber hinaus kann eine Sammlung sprachlich gefaßter Regeln nicht als Wissen gelten, wie es bei manchen Fuzzy-Theoretikern der Fall zu sein scheint.¹²⁸

Die Frage, ob menschliches Wissen in dem Sprachgerüst von Fuzzy-Logik überhaupt ausgedrückt werden kann, ist jedoch sehr vielschichtig und kann hier nicht erschöpfend diskutiert werden. Daher möchte ich mich darauf beschränken, einen Anwendungsfall zu untersuchen, der im Mittelpunkt ingenieurwissenschaftlichen Interesses steht. Dies ist, wie es oben geschildert wurde, die Bedienung technischer Anlagen, in denen komplexe Vorgänge ablaufen, wie etwa Kläranlagen oder Hochöfen. Solche Anlagen sind typische Beispiele für Vorgänge, über deren innere Strukturen kein naturwissenschaftliches Wissen besteht, die aber von erfahrenem Bedienpersonal zufriedenstellend gesteuert werden. Die Erfahrung besteht in einem Wissen über Zusammenhänge zwischen dem beobachteten Verhalten des Prozesses und den angemessenen Reaktionen darauf. Wie sieht es nun in solchen Fällen mit der Übersetzung des menschlichen Wissens in Fuzzy-Algorithmen aus?

Selbst wenn man davon ausgeht, daß Erfahrungswissen über den Umgang mit technisch-physikalischen Prozessen verbalisierbar ist¹²⁹, so ist es doch fraglich, ob die Behandlung eines solchen Prozesses durch den Bediener in die für ein Fuzzy-Modell benötigte Struktur gebracht werden kann. Die ersten Probleme treten schon bei der Erfassung der Prozeßbeobachtung auf. Der Bediener einer technischen Anlage beob-

127 Dabei wird ungeachtet der im vorigen Abschnitt getroffenen Einschränkungen bezüglich der Praxis von einer idealtypischen, linguistisch orientierten Fuzzy-Formalisierung ausgegangen.

128 Vgl. z. B. Pedrycz und Gomido (1998, S. 224): Wissen als „Sammlung von Propositionen in einer Sprache“ und Kosko (1993, S. 193 ff) „Wissen als Regeln“.

achtet den Prozeß als eine Einheit und nicht als eine Summe einzelner Merkmale. Um das Wissen in die für eine Fuzzy-Control Anwendung nötige Form zu bringen, müssen jedoch einzelne Beobachtungsgrößen ausgewählt werden. Dies bedeutet schon eine erhebliche Einschränkung gegenüber der nicht formalisierten Beobachtung. Dazu kommt, daß die Auswahl nicht beliebig ist, da die verwendeten Größen durch technische Geräte meßbar sein müssen, denn die Erfahrungsanwendung soll ja gerade von der menschlichen Expertise unabhängig werden.¹³⁰ Dies bedeutet eine weitere Beschränkung, denn viele Sinneseindrücke, die ein Bediener verwertet, wie die Geräusche, die die Anlage von sich gibt, oder die Farbe des Feuers lassen sich schwerlich messen.¹³¹ Die nächste Hürde ist die Auswahl linguistischer Terme, mit denen die endlich ausgewählten Größen beschrieben werden. Die Fuzzifizierung von Beobachtungsgrößen funktioniert zwar recht gut, wenn diese sowieso schon auf einer technisch vermittelten Wahrnehmung beruhen. Dies ist z. B. bei einer Temperatur der Fall, was die Temperaturbewertung zu einem beliebten Beispiel für die Fuzzifizierung macht. Aber sich einen Kläranlagenwart vorzustellen, der sich auf eine Klassifizierung seines Klärschlammes (vielleicht in schlammig, pappig, schmierig und klebrig?) einläßt und für diese Klassifizierungen auch noch Zugehörigkeitsgrade angibt, fällt schon einigermaßen schwer. Die angeführten Probleme gelten auch für die Ausgangsgrößen der Fuzzy-Inferenz, also die Aktionen, die als Folgerung aus der Zustandsbeobachtung eingeleitet werden. Sicherlich ist es relativ einfach zu beschreiben, daß ein Ventil geöffnet werden soll und hier dürfte es auch hilfreich sein, daß die Fuzzy-Mengentheorie die Möglichkeit bietet zu formulieren, daß es bitte „etwas“ geöffnet werde, anstatt etwa einen Öffnungswinkel von $16,34^\circ$ vorzugeben. Aber was ist mit den vielen anderen kleinen „Tricks“, die ja gerade charakteristisch für erfahrungsgeleitete Anlagenbedienung sind (Einmal leicht auf das Ventil klopfen etc.)? Solche Maßnahmen können nicht als Ergebnis einer Fuzzy-Inferenz auftreten, da nur vorgegebene, elektronisch ansteuerbare Aktoren angesprochen werden können.

Ähnliche Schwierigkeiten treten bei der Umsetzung von vorhandenem Erfahrungswissens in eine Fuzzy-Regelbasis auf. Diese besteht aus Regeln, die in einer Wenn-Dann Struktur die zuvor festgelegten Ein- und Ausgangsgrößen miteinander verknüpfen. Eine Voraussetzung dafür, daß die Erfahrung von Menschen, die mit dem Prozeß vertraut sind, in die Form einer solchen Fuzzy-Inferenz Regel gebracht werden kann, ist somit, daß es sich um regelhaftes Wissen über das Verhalten des Systems handelt. Für die Bedienung komplexer, industriell verwerteter Prozesse ist diese Annahme kaum haltbar.¹³² Die starre Regelstruktur kann die menschliche Wissensanwendung nicht in ihrer Reichhaltigkeit wiedergeben. Zwar gibt es in der Theorie der Fuzzy-

129 Bieker und Schmidt (1985, S. 49) wenden sich deutlich gegen die Annahme, das Wissen industrieller Bediener sei explizierbar. Sie wenden u. a. ein, es sei kaum zu erwarten, daß sich die betroffenen Maschinenführer kooperativ an der Aufnahme ihres Wissens zum Zweck ihrer Ersetzung beteiligten. Dieser Einspruch kommt aus einer vollkommen pragmatischen ingenieurwissenschaftlichen Perspektive heraus. Ähnliche Zweifel äußert Kahlert (1995, S. 87). Neben dem mangelnden Willen des Prozeßbedieners sich an seiner eigenen Ablösung zu beteiligen, nennt er den intuitiven Charakter solchen Wissens und seine Zeitvarianz (Abhängigkeit von Stimmung und Tagesform) als problematisch für die Explizierung.

130 Kahlert (1995, S. 89) nennt als wesentliches Kriterium für die Auswahl der Ein- und Ausgangsgrößen für ein Fuzzy-Control System, die Frage danach, welche Sensoren und Aktoren zur Verfügung stehen.

131 Dies wird allerdings z. B. bei der Schadensvorhersage aus akustischen Signalen an Werkzeugmaschinen versucht. Eine andere Variante findet sich bei Yagashita u. a. (1985). Der Bediener beobachtet hier die Vorgänge im Becken einer Kläranlage und gibt seine Bewertungen, etwa über die Dichte der Flocken, über die Tastatur ein.

Logik eine Fülle ausgeklügelter Verfahren, um die grobe Wenn-Dann Struktur so zu verfeinern, daß sie der komplexen Struktur menschlichen Schlußfolgerns eher angemessen ist.¹³³ Aber auch diese Modifizierungen können nicht verhindern, daß durch die Überführung in einen Regelkanon das Charakteristische des Erfahrungswissens, nämlich seine intuitive, situationsbezogene Anwendung, verlorengeht. Während eine Fuzzy-Control-Strategie nach ihrer Entwicklung fest in dem Regler implementiert ist, ist es einem Bediener immer möglich, neue Beobachtungen in sein Konzept aufzunehmen oder auch auf verschiedene Arten vorzugehen. Diese Kontingenz und Flexibilität kann mit einem Fuzzy-Konzept nicht nachgebildet werden, da immer nur die gleichen einmal vorgegebenen Eingangsgrößen abgefragt werden. Zudem weiß der Bediener um den lokalen und partiellen Charakter seiner Erfahrungsregeln, selbst wenn er nicht explizit angeben kann, unter welchen Randbedingungen sich deren Gültigkeit auf welche Weise verändert. In einem Fuzzy-Chip jedoch sind die Regeln „bedingungslos“ eingebrannt. Hat sich die Situation maßgeblich verändert, kann dies auch von einem Fuzzy-Regler nicht bemerkt werden.¹³⁴ Außerdem beinhaltet menschliche Wissensanwendung immer auch Urteile. In solche Urteile fließen bei der Bedienung technischer Anlagen Kriterien ein, die nichts mit dem Zustand des Prozesses zu tun haben.¹³⁵ Diese Urteilskomponente kann mit einem Fuzzy-Control Algorithmus nicht erfaßt werden. Daher handelt es sich bei der Regelbasis eines Fuzzy-Systems nicht eigentlich um Wissen, sondern um eine Sammlung von Handlungsabläufen.

Die angestellten Überlegungen erhärten die These, daß nur ein sehr kleiner Ausschnitt der Handlungsweise erfahrenen Personals bei der Bedienung technischer Anlagen in eine Fuzzy-taugliche Struktur gebracht werden kann. Während es, bei entsprechender Bemühung, in gewissem Umfang möglich ist, sprachliche Klassifizierung über Fuzzy-Mengen in Zahlen zu übersetzen, bleibt die Fähigkeit, die komplexe Struktur menschlichen Wissens auf diese Weise abzubilden, gering. Hier treffen sich die theoretischen Überlegungen mit den Beobachtungen aus der Praxis. Diese haben gezeigt, daß man sich in der Fuzzy-Literatur zwar sehr viele Gedanken um Operatoren und Inferenzen macht, daß aber praktisch keine Überlegungen zum Problem der Wissensbeschaffung angestellt werden und daß die schwierigen Auswahlsschritte, die hier beschrieben wurden, in der Regel von den Technikentwicklerinnen allein ohne jede Beteiligung von Erfahrungsträgern durchgeführt werden.

Mit diesen Feststellungen soll nun keinesfalls impliziert werden, das Konzept der Fuzzy-Control sei nicht funktionstüchtig. Es ist ganz offenbar sehr wohl möglich, mit einem Fuzzy-Regler ähnliche Ergebnisse wie mit menschlicher Bedienung zu erzielen. Das bezeugen die zahlreichen erfolgreichen Anwendungen von Fuzzy-Control, die die Steuerungsleistung des Bedieners oft sogar noch übertreffen. Die Art und

132 Bieker und Schmidt (1985, S. 50) weisen darauf hin, daß die Art des Wissens industrieller Bediener praktisch unerforscht ist. Ihrer Meinung nach ist es kein Zufall, daß viele Fuzzy-Studien immer gerade den autofahrenden Menschen anführten, da dessen Verhalten relativ gut in Regeln gefaßt werden könne.

133 Allerdings bestehen hier praktische Beschränkungen, denn in der Praxis der Fuzzy-Control verbieten sich häufig kompliziertere Umsetzungen des Inferenzverfahrens aus Gründen der Hardware Implementierung und Rechengeschwindigkeit.

134 Deutlich wird dies an dem legendären Fall der Fuzzy-Waschmaschine, die in Reaktion auf ein ausfärbendes Kleidungsstück ihre Waschkaktivitäten verstärkte, um den vermeintlich hartnäckigen Flecken zu entfernen.

135 So könnte der Arbeiter z. B. einen Prozeß verlangsamen, um seinen Akkord nicht zu überschreiten, oder, weil er weiß, daß die Materialzufuhr stockt.

Weise wie der Prozeß analysiert und behandelt wird, ist jedoch bei einem Fuzzy-Regelungskonzept eine andere als bei einem menschlichen Bediener. Die menschliche Beobachtung und Steuerung eines komplexen Prozesses mit einer Vielfalt von Ein- und Ausgangsgrößen ist durch die Abarbeitung eines mathematischen Regelwerkes ersetzt worden. Statt der postulierten natürlichen Aufnahme „sprachlich gefaßten Wissens“ in das Formalisierungskonzept der Fuzzy-Logik wurde jedoch eine starke Strukturierung des Wissens bei der Fuzzy-Formalisierung aufgezeigt. Sowohl die modellierten Weltausschnitte selbst als auch die Prinzipien, nach denen sie behandelt werden, verändern sich bei einer Fuzzy-Control Implementierung zwangsläufig. Dabei hat sich gezeigt, daß die Formalisierung von Prozeß und Bedienung in einem Fuzzy-Formalismus sehr stark von technischen Strukturierungen bestimmt ist, so daß von einer technischen Rekonstruktion des modellierten soziotechnischen Systems gesprochen werden kann. Fuzzy-Logik ist damit ein Kalkül, mit dem es möglich ist, einen entsprechend zugerichteten Vorgang innerhalb festgesteckter Rahmenbedingungen mit mindestens gleichem „Erfolg“ wie ein menschlicher Bediener zu beeinflussen. Damit das technisch rekonstruierte System jedoch reibungslos funktionieren kann, mußten sowohl das Wissen als auch der Prozeß und seine Umgebung umstrukturiert und damit Wirklichkeit rekonfiguriert werden.

Damit zeigt sich, daß der zu Beginn dieser Arbeit entwickelte Begriff von einem ingenieurwissenschaftlichen Modell als Instrument zum Eingriff in die Wirklichkeit statt als deren nachahmender Beschreibung für Fuzzy-Modelle in einem sehr konkreten Sinne zutrifft. Dennoch ist es auffällig, daß in vielen Publikationen für die Fuzzy-Formalisierung zusätzliche Qualitäten wie etwa die Nähe zu menschlicher Intuition oder der Komplexität der Natur reklamiert werden. So wird in der Fuzzy-Logik eine Alternative zu reduktionistischen Denkweisen in der Technikentwicklung gesehen oder sogar eine Abkehr von westlichem „dualistischen“ Denken hin zu östlicher Mehrwertigkeit vermutet. Angesichts des technischen Erfolgs der Fuzzy-Technologie bestünde keine Notwendigkeit zu solchen „ideologischen“ Belegungen. Das diese dennoch in einem solchen Maße vorhanden sind hat sicherlich verschiedene Ursachen. Einerseits bietet die Fuzzy-Rhetorik der Ingenieurs-Community eine Möglichkeit, sich in den Diskurs über eine menschengerechte Technikentwicklung einzubringen und so dem negativen Image moderner Technologien und ihrer Protagonisten entgegenzusteuern. Des weiteren wird aber am Beispiel der Fuzzy-Logik einmal mehr deutlich, daß der Anspruch, die Welt in ihrem Wesen abzubilden und nicht nur funktionierendes Zugriffswissen zu liefern, eine zentrale Funktion im technikwissenschaftlichen Selbstverständnis einnimmt.

3.5.8 Fuzzy-Logik und klassische Steuerungstechnik – Ein fusseliges Verhältnis

In dem vorangegangenen Abschnitt wurde dargestellt, daß bei der Fuzzy-Modellierung das verarbeitete Wissen umstrukturiert werden muß. Dabei wurde der Anspruch der Fuzzy-Logik, menschliche Denk- und Handlungsweisen wiedergeben zu können, in weiten Teilen hinterfragt. Bisher unbeachtet blieb jedoch das Wissen derjenigen, die die Modellierung selbst betreiben. Auch dieses Wissen wird mit dem Aufkommen neuer Methoden wie der Fuzzy-Logik zwangsläufig verändert. Gewohnte Denkmuster werden durchbrochen und neue Sichtweisen müssen angenommen werden. Dies läßt sich an dem beschwerlichen Siegeszug der Fuzzy-Logik gut beobachten. Fuzzy-Logik

ist mit ihrem heuristischen Vorgehen und der fehlenden mathematischen Stabilitätsanalyse ein Fremdkörper im Wissensbestand klassischer Ingenieurwissenschaft. So kommt es, daß besonders bei den Steuerungstechnikern alter Schule erhebliche Vorbehalte gegen Fuzzy-Control bestanden und z. T. noch bestehen. Inzwischen scheint sich jedoch die Fuzzy-Forschung so vieler mathematischer Verfahren der Datenanalyse zu bedienen, daß das anfängliche Image einer Bastelwissenschaft sich überholt hat. Mit dieser Mathematisierung dürfte auch der Prestigegewinn des Feldes zu tun haben, denn gerade der fehlende mathematische Unterbau war ein häufiger Kritikpunkt an der Fuzzy-Control.¹³⁶ Dennoch ist es offensichtlich, daß zu der Entwicklung von Fuzzy-gestützten Regelungskonzepten andere Denkweisen als in der traditionellen Steuerungstechnik gefragt sind. Der klassische PID-Regler¹³⁷ für den eine Fülle von empirischen Einstellungs-Methoden entwickelt wurden, gerät zunehmend ins Hintertreffen, da er sich nicht für die „großen Zukunftsaufgaben“ – die Steuerung komplexer nichtlinearer Systeme – eignet. Jedoch auch von fortgeschritteneren Konzepten moderner analytisch orientierter Regelungstheorie unterscheidet sich die Fuzzy-Control in ihrer ganzen Herangehensweise grundlegend. Während es bei klassischen und modernen analytisch basierten Verfahren der Regelung technischer Systeme wesentlich ist, sich in die naturwissenschaftlichen Grundlagen des zu steuernden Systems einzuarbeiten, ist dies bei der Anwendung von Methoden wie der Fuzzy-Formalisierung nicht mehr unbedingt notwendig. Dafür gewinnen Kenntnisse über statistische Verfahren der Datenauswertung, sowie über Computer Soft- und Hardware auch für die Modellierung an Bedeutung. Auch die prinzipielle Vorgehensweise ist für Fuzzy-Modellierung deutlich anders als bei klassischen Verfahren. Für die Auswahl der Elemente eines Fuzzy-Modells existieren keine systematischen Vorgehensweisen. In der Regel wird so lange herumprobiert, bis zufriedenstellende Ergebnisse produziert werden. Der subjektive Anteil ist daher bei der Fuzzy-Modellierung relativ hoch. Dies wird in vielen Fachbüchern zur Reglerauslegung mit Fuzzy-Control betont und auch als Kritikpunkt an dieser Methode genannt. Die fehlende Stabilitätsanalyse bedeutet einen Verzicht auf mathematisch zu beschreibende Sicherheit, die in der traditionellen Regelungstechnik einen sehr hohen Stellenwert hat. Um zu zeigen, daß hier Fachkulturen im Umbruch sind, muß daher gar nicht der kulturelle Gegensatz zwischen „östlichem mehrwertigem Denken“ und „westlichem Schwarz/Weiß-Rechnen“ bemüht werden. Vielmehr geht es um zwei Arten des Rechnens, verschiedene Instrumente bei der Verarbeitung von Welt, die beide ihre spezifischen Wissensformen aufweisen und unterschiedliche Eingriffs- und Gestaltungsmöglichkeiten liefern.

3.5.9 Fuzzy-Modellierung als universelle Funktionsapproximation

Die bisherigen Ausführungen haben sich zu einem großen Teil an der fusseligen Verpackung abgearbeitet. Dabei wurde festgestellt, daß viele der Etiketten, die dieser Verpackung anhaften, deren Inhalt nicht adäquat beschreiben. Daher fragt es sich jetzt, welche Eigenschaften es denn tatsächlich sind, die Fuzzy-Logik zu einem so

¹³⁶ Dazu der Dortmunder Informatik Professor Bernd Reusch: „Wir befinden uns in einer Phase in der die Praktiker kommen und sagen: 'hier funktioniert es, da aber nicht' Deshalb werden längst praxiswirksame Funktionsabläufe, zu stark entwickelt nach dem Trial-and-Error Prinzip, nun systematisch nachgearbeitet.“ Zitiert nach Haars (1997, S. 15).

¹³⁷ PID (Proportional, Integral und Differential)-Regler: Elektronische Regeleinrichtung mit einstellbaren Faktoren für die drei möglichen Verarbeitungsweisen des Eingangssignals.

überaus erfolgreichen Werkzeug der Technikentwicklung machen. Meine These ist es, daß das Fuzzy-Formalisierungsverfahren für die moderne Technikentwicklung vor allem deshalb interessant ist, weil es schnell und einfach formale Strukturen produzieren kann, die verschiedenste Arten von Werteverläufen repräsentieren. Formale Strukturen mit dieser Fähigkeit können als „Universelle Approximatoren“ bezeichnet werden. Ihre Anwendungen zielen darauf, beliebige Zusammenhänge zwischen gemessenen Daten aufzuspüren und nachzubilden. Dabei wird davon ausgegangen, es gäbe eine – meist nichtlineare – mathematische Funktion, die den Zusammenhang zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen eines Prozesses beschreibt, diese sei aber mit analytischen Mitteln nicht zu finden. Daher wird der Approximator solange verstellt, bis er die vorhandenen Daten mit zufriedenstellender Genauigkeit abbildet. Auf diese Weise hat man nun ein Abbild der unbekannten Funktion gefunden, ohne allerdings zu wissen, inwieweit dieses eine Struktur des Prozesses wiedergibt. Im Extremfall hat man nur eine Art Datenspeicher geschaffen. Die geschilderte Funktionsapproximation kann zur Nachbildung beliebigen Systemverhaltens eingesetzt werden. Es spielt keine Rolle ob die approximierten Werteverläufe von technischen Systemen, physikalischen Prozessen oder von menschlichen Akteuren erzeugt werden. Zudem hat es kaum eine Bedeutung, welche mathematischen Eigenschaften die Werteverläufe haben. So können ohne besondere Vorkehrungen auch beliebige nichtlineare Funktionen approximiert werden. Um die Modellierung zu beginnen, sind keine qualitativen Annahmen über das Systemverhalten notwendig. Es müssen lediglich Meßdaten über das System in ausreichender Zahl und Qualität vorliegen. Je „universeller“ ein Approximator ist, desto weniger Vorwissen ist zur Modellierung notwendig. Eine Modellierung über Funktionsapproximation liefert stets Black-Box Modelle, da keine expliziten Beschreibungen der wirkenden Prinzipien in dem Modell enthalten sind.¹³⁸ Aufgrund der genannten Eigenschaften ist die Verhaltensnachahmung durch universelle Approximatoren immer dann für die technische Behandlung von Weltausschnitten interessant, wenn eine analytische Modellierung einen zu hohen Aufwand mit sich bringt.¹³⁹

Die Sichtweise auf Fuzzy-Logik als Werkzeug zur Funktionsapproximation findet sich auch in einigen Publikationen zu dem Thema wieder. Besonders ausgeprägt wird sie von Bart Kosko vertreten. Kosko stellt das Konzept der Fuzzy-Funktionsapproximation gegen die seiner Ansicht nach überholte „linguistische Auffassung“, nach der Fuzzy-Logik zur Modellierung menschlichen Denkens geeignet sei. Die sprachliche Fassung von Regeln dient nach Kosko lediglich als ein schneller Einstieg in die Funktionsapproximation:

„Words are just a tool or ladder we climb down on to the task of function approximation“ (Kosko 1997, S. xix).

Stattdessen handelt es sich für Kosko bei Fuzzy-Logik um einen geeigneten Weg, um Sprache („Speech“) und gemessene Handlungen („measured action“) in Form von Funktionen zu fassen. Kosko legt Wert auf die Bezeichnung „Fuzzy Engineering“ für dieses Vorgehen, um die mathematische Basis und damit die Wissenschaftlichkeit des Ansatzes zu betonen. Fuzzy-Logik stellt damit für die Technikentwicklung sehr wohl neue Zugangsweisen zur Verarbeitung technischer Systeme bereit. Sprachlichkeit ist

¹³⁸ Vgl. zur Begrifflichkeit der Black/White-Box Abschnitt 3.2.

¹³⁹ In Abschnitt 3.5.5 wurde gezeigt, daß dieser Aufwand ebenso wie die Bereitschaft ihn zu treiben von sozialen Strukturierungen des Technikeinsatzes abhängt.

dabei jedoch nicht deswegen ein Vorteil, weil sie bestimmte Vorgänge besonders gut erfaßt, sondern weil sie für bestimmte Zwecke eine günstige Vorgehensweise ermöglicht. Dazu noch einmal Bart Kosko (1997, S. xix):

„On this view fuzzy language is a means to the end of computing and not the other way around. To compute is to turn inputs into outputs or to turn causes into effects or to turn questions into answers. Systems do that and we model them as functions. Systems compute and so do fuzzy systems. What matters is how well they do it and at what cost. Any match-up with natural language is a bonus and not a goal.“

Ein Beispiel dafür, wie Fuzzy-Logik als Approximationswerkzeug eingesetzt werden kann, ist die Nachbildung klassischer Regler, wie sie Jörg Kahlert beschreibt:

„Auch diese Entwurfsmethodik hat mit dem eigentlichen Sinn von Fuzzy-Control wenig zu tun ist aber in der Praxis (erschreckend?) stark verbreitet. Das Grundprinzip liegt dabei darin, zunächst einen Fuzzy-Controller zu entwerfen, der einem bereits in Betrieb befindlichen oder vorab entworfenen klassischen Regler – meist vom PID-Typ – soweit wie möglich entspricht. Die zusätzlichen Freiheitsgrade des Fuzzy-Controllers werden dann anschließend genutzt, um eine Optimierung der Regelkreisdynamik bezüglich irgendwie gearteter Gütekriterien vorzunehmen. Diese Optimierung kann je nach Aufgabenstellung per Hand (meist nach dem „Trial and error“-Prinzip) oder mit geeigneten numerischen Verfahren erfolgen.“ (Kahlert 1995, S. 88)

Ein weiteres Beispiel ist die schon erwähnte Automatisierungsstrategie, in der das Verhalten der Bedienerinnen oder Nutzer technischer Geräte vermessen und mit Fuzzy-Approximation nachgebildet wird. An solchen Anwendungen wird deutlich, wie pragmatisch und flexibel Fuzzy-Methoden eingesetzt werden. Mit ihrer Hilfe können auch Zusammenhänge nachgebildet werden, die aus vollkommen anders orientierten Techniken der Systemanalyse hervorgegangen sind.

3.5.10 Wie schwarz ist ein Fuzzy-Modell?

Methoden der Funktionsapproximation produzieren, wie oben dargelegt wurde, stets Black-Box Modelle. Diese repräsentieren nicht die inneren Wirkungsstrukturen des modellierten Systems, sondern bilden nur sein Verhalten nach. Die Klassifizierung von Fuzzy-Modellierung als Black-Box Ansatz ist jedoch nicht so eindeutig wie etwa bei „Künstlichen Neuronalen Netzwerken“ und wird sicherlich nicht von jedem Modellierungstheoretiker geteilt werden.¹⁴⁰ Klar liegt der Fall nur dann, wenn alle Elemente des Modells und vor allem die Regelbasis über automatische Verfahren der Datenanalyse ermittelt werden. In solchen Fällen bestehen nur graduelle Unterschiede zwischen der Fuzzy-Formalisierung und anderen klassischen Verfahren der Black-Box Modellierung. Anders sieht es aus, wenn auf von Menschen formulierte Regeln über eine Prozeßführung zurückgegriffen wird. Werden solche Regeln über das beschriebene Vorgehen in Regeln für eine automatische Systemsteuerung umgesetzt, so handelt es sich um eine White-Box Modellierung einer spezifischen Umgangsweise mit dem modellierten System.¹⁴¹ Diese Umgangsweisen wiederum beruhen

¹⁴⁰ Kosko (1997) bezeichnet den Fuzzy-Ansatz als „Modellfrei“, Ross (1995) spricht dagegen gerade von modellbasierten Verfahren. Isermann (1997) faßt Fuzzy-Modelle eines bestimmten Typs (Takagi-Sugeno Typ) als „Dark-Grey-Box“ Ansätze.

¹⁴¹ Das bedeutet ebensowenig wie bei einer naturwissenschaftlich basierten „White-Box“ Modellierung, daß die modellierten Umgangsweisen unverändert abgebildet werden können, wie in 3.5.7 gezeigt wurde.

jedoch in der Regel auf Beobachtungen des Systemverhaltens und nicht auf einer Analyse innerer Zusammenhänge. Daher handelt es sich auch in solchen Fällen *in Bezug auf den behandelten Vorgang* um einen Black-Box Ansatz.¹⁴² Die Frage nach der Menschlichkeit fusseliger Weltkonstruktionen kann jetzt noch einmal anders aufgegriffen werden. Die Funktion des universellen Approximators kann zwar insofern als äquivalent mit menschlichen Umgangsweisen betrachtet werden, als diese ebenfalls nicht auf einer Analyse innerer Strukturen, sondern auf einer Beobachtung des Prozeßverhaltens von außen beruhen. Diese Gemeinsamkeit ist jedoch – das hat der Blick auf die Praxis von Fuzzy-Anwendungen aber auch die Analyse der Formalisierungsweise deutlich gezeigt – eine rein oberflächliche. Es hat sich gezeigt, daß eine Fuzzy-Modellierung zwar jeden Zusammenhang zwischen Prozeßgrößen abbilden kann, daß aber menschliches Wissen über einen Prozeß nicht beliebig in solche Zusammenhänge zu bringen ist. Für eine erfolgreiche Fuzzy-Formalisierung menschlichen Handelns muß dieses ebenso umgeformt werden, wie die behandelten materiellen Strukturen in einer analytischen Modellierung mit der Methode der Finiten Elemente.

3.5.11 Umordnungen im Fuzzy-Computerlabor

Die Bewertung von technologischer Fuzzy-Logik Anwendung als Werkzeug einer universellen Approximation nimmt diesem Verfahren einiges von seinem exotischen Image. Stattdessen kann seine Ausbreitung als ein Indiz für die zunehmende Bedeutung der Verhaltensnachahmung zum Zwecke der Formalisierung von Weltausschnitten in der Technikentwicklung interpretiert werden. Eine zentrale These dieser Arbeit ist es jedoch, daß die Formalisierungsweisen der Technikwissenschaften als ein Bestandteil der Produktion gesellschaftlicher Rationalität insgesamt interpretiert werden können. Die Ausbreitung einer neuen Methode technologischer Formalisierung bedeutet demnach immer auch die Entwicklung neuer Formen des Zusammenwirkens sozialer und materieller Komponenten in soziotechnischen Strukturen. Um diesen Zusammenhang beschreiben zu können, wurde die Modellierung von Welt in der Technikentwicklung als eine Kette von Übersetzungsschritten, in denen die Wirklichkeit sowohl symbolisch als auch konkret materiell rekonfiguriert wird, konzeptualisiert. Dieser Vorgang der Dekontextualisierung, Formalisierung und Rekontextualisierung von Weltausschnitten läuft nicht beliebig ab sondern ist – so die Vermutung – von gesellschaftlichen Strukturierungen durchdrungen. Technikentwicklung als die Konstruktion eines „materiellen Dispositivs“ kann damit als Teil der Stabilisierung oder Generierung eines gesellschaftlichen Dispositives begriffen werden. Die einzelnen Konstruktionsschritte verlaufen für jedes Modellierungsverfahren entlang anderer Grenzlinien. Welche Eigenschaften sind nun gerade für die fusselige Rekonfiguration von Wirklichkeit charakteristisch? Zur besseren Darstellung werden hier die formalen Umordnungen innerhalb des Fuzzy-Labors und die Umformungen soziotechnischer Strukturen bei der Implementierung fusseliger Technik getrennt voneinander behandelt. Tatsächlich gehen diese beiden Bereiche jedoch ineinander über.

¹⁴² Ich gehe hier von der Standardkonfiguration aus. Es gibt auch einige Versuche, mit Fuzzy-Logik explizit Prozesse selbst zu modellieren z. B. zur Vorhersage von Systemzuständen. Dies ist aber ein Randgebiet der Fuzzy-Technologie und fällt eher in den Bereich der KI-Systeme.

Charakteristika fusseliger Formalisierung

Da bei einer Funktionsapproximation nicht die Struktur, sondern lediglich das Verhalten eines Systems nachgebildet wird, muß nicht – wie bei der Aufstellung der System-differentialgleichungen – explizit ausgewählt werden, welche Phänomene in die Modellierung einbezogen werden und welche nicht. Dennoch handelt es sich bei der Fuzzy-Formalisierung keinesfalls um eine mimetische Angleichung an bestehende Verhältnisse. Vielmehr haben die vorangegangenen Ausführungen gezeigt, daß für die erfolgreiche Entwicklung eines Fuzzy-Control Konzeptes sowohl das Wissen über einen Prozeß und das Wissen über Modellierung, als auch schließlich der Prozeß selbst verändert werden müssen. Ein wesentlicher Schritt der Dekontextualisierung ist bei der Fuzzy-Modellierung die Auswahl der Ein- und Ausgangsgrößen, die über die Regeln verknüpft werden sollen. Dieser Auswahlsschritt war in hohem Maße durch technische Strukturierungen bestimmt. Weitere zentrale Abgrenzungsschritte sind die Auswahl der Fuzzy-Mengen, denen die ausgewählten Größen zugeordnet werden sollen und die Bestimmung der Zugehörigkeitsfunktionen, die diese Zuordnung umsetzen. Die Wahl der Regeln zergliedert den Handlungsraum des Fuzzy-Systems in eine Sammlung von Handlungsanleitungen für diskrete Systemzustände. Über die Bestimmung der Inferenz und der Operatoren werden die bis dahin generierten formalen Strukturen zu einem System verknüpft, das algorithmisch abgearbeitet werden kann. Die Entscheidungsakte, bei denen Wissen eingebracht wird, um einen bestimmten Schritt bei der Konstruktion des Modelles zu gehen, sind hier gegenüber der analytischen Modellierung deutlich verschoben. Wesentliche Vorstrukturierungen des Modells werden bei der Fuzzy-Logik über die Auswahl der Operatoren und der Zugehörigkeitsfunktionen, die die linguistischen Terme modellieren, vollzogen.¹⁴³ Die Wahl der logischen Operatoren zur Inferenz-Modellierung ist eine Konstruktionsleistung des Modellierers, die die Funktion des Modells erheblich beeinflusst.¹⁴⁴ Diese Art von Vorwissen, die in das Modell eingebracht wird, betrifft nicht die Struktur und die Eigenschaften des Originalsystems, sondern die Informationsverarbeitung innerhalb des Modells, also die Eigenschaften des Approximators. Mit der Verbreitung verhaltensnachahmender Formalisierungstechniken, verlagert sich der Schwerpunkt technikwissenschaftlichen Forschens von der Analyse der behandelten Weltausschnitte selbst, zu deren Handhabung über Algorithmisierungs-Techniken. Dies gilt für die Fuzzy-Modellierung, die sich in technikwissenschaftlichen Zusammenhängen direkt auf die Implementierung einer Kontrollstrategie und nicht auf die Nachbildung des Systems selbst richtet, in besonderem Maße. Hier wird das klassische Projekt der Naturbeherrschung mittels naturwissenschaftlich basierter Analyse und darauf gründender Synthese materieller Strukturen zu technischen Artefakten durch ein heuristisches Verfahren ersetzt, das sich direkt auf die Generierung eines optimal gesteuerten Systems richtet. Voraussetzung für das Funktionieren eines solchen Systems ist

143 Vgl. Küpper (1995, S. 2): „Bei konventionellen Modellen muß dagegen [...] sehr viel mehr A-priori-Wissen über die Nichtlinearitäten und deren Struktur vorliegen. Jedoch sind auch bei Fuzzy-Modellen Annahmen über die zu modellierenden Prozesse zu machen, um so die Modelle vorzustrukturieren. Dabei ist Struktur hier in Abgrenzung zur üblichen Verwendung anders definiert: Zu ihr gehören u. a. die Auswahl der fuzzy-logischen Operatoren, der notwendigen Eingangswerte und geeigneter Fuzzy-Referenzmengen.“

144 Dies zeigen z. B. Kiszka u. a. (1985) in ihrer Untersuchung des Einflusses der Modellparameter eines Fuzzy-Modells auf dessen Verhalten. Ausführlich geht auch Kahlert (1995) auf die lokalen und globalen Auswirkungen einzelner Modellparameter wie Skalierungsfaktoren, Anzahl der Zugehörigkeitsfunktionen, Defuzzifizierungsverfahren etc. auf das Verhalten eines Fuzzy-Reglers ein.

jedoch eine hochgradig technisch strukturierte Rekonfiguration des betreffenden Wirklichkeitsausschnittes. Nur weil durch zahlreiche technische Kontrollinstrumentarien eine bestimmte Funktionsweise erzwungen wird, kann technologische Intervention darauf verzichten, die „inneren Vorgänge“ in den verarbeiteten materiellen Strukturen zu kennen.

3.5.12 Fusselige Anteile soziotechnischer Strukturen

In Abschnitt 2.7 wurden einige zentrale Knoten soziotechnischer Strukturen ausgemacht, die sich in Abhängigkeit vom Modellierungsverfahren anders knüpfen könnten. In Abschnitt 3.2 wurden erste Vermutungen über Zuordnungen zwischen Modellierungsansatz und den Ausprägungen dieser Verknüpfungen angestellt. Der Gültigkeitsbereich des Modells und die Art von dessen Nachweis beeinflusst die *Flexibilität* der Technologie. Die Art *Zugriffsmöglichkeiten*, die das Modell bereitstellt, bestimmt die gesellschaftlichen Verarbeitungsmöglichkeiten und von der *Transparenz* des Modells hängt es ab, wer im Inneren der Technikentwicklung mitsprechen kann. Die Ansprüche der technischen Systeme an den Umbau und die Kontrolle ihrer Umgebung wurden als *Laboraausweitung* gefaßt. Hier soll nun gefragt werden, wie sich die spezifisch fusselige Art der Wirklichkeitsverarbeitung in dem Zusammenwirken der Fuzzy-Technologie mit ihrer Umwelt auswirkt.

Flexibilität gegenüber Veränderungen der Einsatzbedingungen oder der Nutzungsweisen

Im Gegensatz zu einer physikalischen Modellierung, bei der explizite Entscheidungen über Vernachlässigungen und Randbedingungen getroffen werden, ist es bei einem Black-Box Modell nicht möglich anzugeben, von welchen Bedingungen die Gültigkeit des Modells prinzipiell abhängt. Dies gilt auch für Fuzzy-Modelle. Wenn sich die Umgebungsbedingungen ändern, kann nicht hergeleitet werden, wie das Modell verändert werden muß. Der Vorgang der Funktionsapproximation muß neu durchgeführt werden.¹⁴⁵ Solche Veränderungen in den Betriebsbedingungen treten z. B. dann auf, wenn das technische System an einem anderen Ort oder unter anderen Bedingungen betrieben werden soll. Aber auch während eines vorgesehenen Betriebs können sich die Einsatzbedingungen aus verschiedenen Gründen verändern. Eine automatisierte Steuerung kann jedoch nur auf Veränderungen reagieren, die auch programmgemäß gemessen und verarbeitet werden. Diese Beobachtungen treffen auf jede Automatisierung technischer Systeme zu. Für die Fuzzy-Automatisierung hat dieser Aspekt jedoch eine besondere Bedeutung, da sie häufig direkt auf die Nachbildung und den Ersatz menschlicher Steuerungsleistungen statt nur auf die Automatisierung einzelner Vorrichtungen zielt. Der Verlust an Flexibilität und Variabilität möglicher Betriebsweisen technischer Systeme ist daher besonders ausgeprägt. Ein wesentlicher Unterschied zwischen der Prozeßbeobachtung eines Fuzzy-Reglers und der eines menschlichen Beobachters ist, wie oben argumentiert wurde, daß die auszuwertenden Eingangsgrößen und die möglichen Eingriffe eines Fuzzy-Reglers beschränkt sind. Sollen andere Kriterien in die Prozeßbedienung aufgenommen werden, so ist es mit

¹⁴⁵ Zur Illustration ein konstruiertes Beispiel: Eine modellbasierte technische Anlage soll in einem Gebiet mit einer anderen durchschnittlichen Außentemperatur betrieben werden. Bei einem physikalischen Modell könnte man diejenigen Gleichungen, die von der Temperatur abhängen, modifizieren und in dem Modell den neuen Wert für die Außentemperatur einsetzen. Bei einem Fuzzy-Modell läßt sich dagegen nicht sagen, ob und wie das Approximationsergebnis mit der Temperatur zusammenhängt.

einer einfachen „Umprogrammierung“ nicht getan. Vielmehr muß das gesamte Meß- und Kontrollinstrumentarium auf die neuen Einflußgrößen ausgerichtet werden. Das Gleiche gilt, wenn andere Beeinflussungsmaßnahmen zugelassen werden sollen. Auch die Optimierungskriterien, nach denen eine Fuzzy-gestützte Prozeßautomatisierung betrieben wird, sind nur noch schwierig zu verändern, wenn die ganze Prozeßführung darauf ausgerichtet wurde. Ein ähnlicher Zusammenhang wurde für Fuzzy-Alltagstechnologie aufgezeigt. Zwar erleichtert die Fuzzy-Methodik die Entwicklung von Artefakten, die auf individuelle Bedürfnisse abgestimmt sind oder sogar von den Nutzern selbst darauf abgestimmt werden können. Um die Fuzzy-Formalisierung bis zum tatsächlichen Technikeinsatz und damit für die Nutzer offen zu halten, müssen jedoch spezielle Maßnahmen getroffen werden. Andernfalls bedeutet der höhere Automatisierungsgrad der entwickelten Geräte eine Reduzierung der möglichen Verwendungsweisen und eine speziellere Festlegung auf bestimmte Kriterien des Betriebs. Für diese Ausprägung von Fuzzy-Konsumtechnologie fanden sich auffällig mehr Beispiele als für flexible, auf individuelle Bedürfnisse abstimmbare Produkte.

Eingriffsmöglichkeiten in der Entwicklung

Aus den vorangegangenen Analysen ist hervorgegangen, daß das Fuzzy-Formalisierungsverfahren die Einbeziehung verschiedenster Wissensanteile bei der Entwicklung technischer Systeme möglich macht. Auch Personen, die wenig mit den technischen Details der Automatisierungstechnik vertraut sind, können Regeln in einen Fuzzy-Algorithmus einbringen. Obwohl der Anspruch, mit Fuzzy-Logik menschliche Vorgehensweisen abbilden zu können nur sehr rudimentär eingelöst werden kann, weist die Fuzzy-Technologie daher ein gewisses Potenzial für eine partizipative Technikgestaltung auf. Gleichzeitig wurde jedoch festgestellt, daß dieses Potenzial in der Realität kaum genutzt wird. Stattdessen steht in der Praxis der Technikentwicklung die Fähigkeit des Fuzzy-Formalisierungssystems zur universellen Approximation im Mittelpunkt. Dabei werden die Eingriffsmöglichkeiten von Personengruppen außerhalb des inneren Kreises der Technikentwickler eher reduziert als erweitert.

Transparenz

Ein sehr wichtiges Merkmal für die Einbettung technischer Systeme in ihre soziotechnische Umgebung ist die Transparenz der Prinzipien, nach denen sie betrieben werden. Sie ist es, die festlegt, durch wen und wie das Verhalten technischer Systeme bewertet werden kann. Im Zusammenhang mit Fuzzy-Control wird der Aspekt der Transparenz und Beherrschbarkeit immer wieder hervorgehoben. So z. B. in der VDI Zeitschrift mit folgenden Worten:

„Die Fuzzy-Technologie verschafft dank anschaulicher Regeln und Sprache einen unmittelbaren Zugang zum Prozeß und macht ihn damit für den Menschen beherrschbar“ (Billerbeck/Bönsch 1991, S. 13)

Dabei wird gerade die Transparenz der implementierten Vorgehensweisen häufig als Vorteil gegenüber den konnektionistischen Modellen, die in Abschnitt 3.6 behandelt werden, genannt. Aber auch im Vergleich mit klassischen Regelungskonzepten, die auf naturwissenschaftlich basierten White-Box Modellen beruhen, zeichnet sich Fuzzy-Control durch die Transparenz der Regelungsstrategie aus. Denn diese besteht bei den klassischen Optimierungsverfahren aus sehr komplizierten mathematischen Algorithmen. Die einfache Verständlichkeit des Fuzzy-Regelungskonzeptes ist aller-

dings bei solchen Anwendungen, die eine automatische Generierung der Regeln vornehmen, nicht mehr gegeben. Hier wird meistens von allen möglichen regelhaften Verknüpfungen ausgegangen, was zu einer sehr großen Anzahl von Regeln führt (Regelexplosion). Für eine menschliche Beherrschbarkeit wäre jedoch eine überschaubare Anzahl von Ein/Ausgangsgrößen und Regeln unerlässlich. Dieses Kriterium scheint jedoch in der Praxis keine große Rolle zu spielen. Oben wurde gezeigt, daß die einfache Durchschaubarkeit des Fuzzy-Modells ohnehin nur in Bezug auf die implementierte Regelungsstrategie gegeben ist. Das Prozeßmodell, das dabei implizit verarbeitet ist, liegt in der dunklen Ecke der Fuzzy „Dark-Grey-Box“. Damit wird deutlich, daß Fuzzy-Modellierung zwar nicht die Prozesse selbst transparent macht, daß aber die Möglichkeit zur transparenten Prozeßsteuerung mit Fuzzy-Logik gegeben ist. Diese Möglichkeit wird aber nicht automatisch von jeder Fuzzy-Implementierung genutzt, vielmehr muß dazu die Transparenz ein erklärtes Entwicklungsziel sein.

Laborausweitung

Mit der Hilfe von Fuzzy-Logik werden in der Technikentwicklung zahlreiche Interaktionen menschlicher Akteure und technischer Systeme automatisiert. Die Algorithmen, die einer solchen automatisierten Steuerung zugrunde liegen, wurden auf die Erfüllung spezifischer Kriterien hin entwickelt. Damit handelt es sich um hochgradig soziale Anteile technischer Systeme. Gleichzeitig sind die Konzepte der Steuerung jedoch der direkten Verfügung durch viele soziale Akteure entzogen. Sie erfordern eine Anpassung der die Systeme umgebenden soziotechnischen Strukturen, an die in den Algorithmen der Steuerung vorgesehenen Funktionsweisen der technischen Systeme. Dieser Vorgang der Anpassung sozialer Interaktionen an die Vorgaben technisch realisierter sozialer Strukturen ist ein klassischer Aspekt technisierter Gesellschaften.¹⁴⁶ Eine neue Dimension in diesen Zusammenhang scheint jedoch die Fuzzy-Modellierung insofern zu eröffnen, als sie die Verbreitung algorithmisierter Bereiche innerhalb soziotechnischer Systeme auch dort befördert, wo gesellschaftliche Strukturierungen die Anwendung klassischer Verfahren zuvor als unrentabel erscheinen ließen. Diese Verbreitung technisierter Anteile von Technikeinsatz in alltägliche Bereiche muß meines Erachtens als ein wesentlicher Anteil der Fuzzy-Logik an der Produktion materieller Anteile des bestehenden gesellschaftlichen Dispositivs betrachtet werden.

3.5.13 Fazit

Es hat sich gezeigt, daß die Fuzzy-Logik zwar kein menschliches Wissen umsetzt, daß sie aber durchaus Potenziale für eine partizipative, nutzerfreundliche und transparente Gestaltung von Technologie bietet. Damit diese jedoch genutzt werden, müssen entsprechende Kriterien in der Technikentwicklung bewußt angelegt werden. Anderenfalls kann Fuzzy-Logik als Instrument zur Funktionsapproximation herangezogen werden, ohne daß sich dies in der Funktion technologischer Systeme anders als in einer effektiveren Erfüllung von Marktkriterien niederschlägt. Die Tatsache, daß sich diese Variante des Fuzzy-Einsatzes offenbar in weiten Teilen durchgesetzt hat, weist darauf hin, daß innerhalb des bestehenden Dispositivs gesellschaftlicher Technikver-

¹⁴⁶ Wenn auch, wie neuere Forschungen zu Techniknutzung vielfach gezeigt haben, längst nicht der einzige Aspekt der Technikverwendung innerhalb dieser Gesellschaften.

3.5 Fuzzy-Modellierung

wendung, die Schaffung flexibler, transparenter und lokal zugänglicher technischer Systeme keine ausnehmend hohe Priorität besitzt.

3.6 Konnektionistische Modelle – Die verteilte Welt

3.6.1 Einführung in die Netzwelt

„Konnektionistische Systeme“ sind informationsverarbeitende Strukturen, die in einigen Aspekten von bestimmten Vorstellungen über den Aufbau und die Arbeitsweise biologischer Gehirne inspiriert sind. Daher werden sie auch häufig als „Künstliche Neuronale Netze“ (KNN) bezeichnet. Hier soll jedoch die Bezeichnung „konnektionistisches System“ verwendet werden, um die Implikation einer biologischen Grundlage zu vermeiden. Durch gezielte Manipulationen kann erreicht werden, daß konnektionistische Systeme Zusammenhänge zwischen Datensätzen repräsentieren. Diese Anpassung wird als „Training“ oder „Lernen“ bezeichnet. Es existiert eine große Vielfalt verschiedener Netzwerkarchitekturen und Lernverfahren, über die in Abschnitt 3.6.2 ein Überblick gegeben wird. Einige für die Technikentwicklung besonders relevante Strukturen werden dort genauer geschildert.

Die Möglichkeit, Zusammenhänge nachzubilden, ohne daß explizite Regeln eingegeben werden müssen, unterscheidet das konnektionistische Vorgehen grundlegend von Techniken der symbolorientierten künstlichen Intelligenz, von der physikalisch begründeten mathematischen Modellierung und auch von der reinen Fuzzy-Logik.¹⁴⁷ Diese Fähigkeit konnektionistischer Systeme läßt sich – wie noch zu schildern sein wird – auf vielfältige Weise für Belange der Technikentwicklung nutzen. Dabei ist eine biologische Plausibilität der konnektionistischen Systeme nicht von praktischer Bedeutung.¹⁴⁸ Die Wurzeln des Ansatzes sind jedoch in der Neurophysiologie zu finden, wo Versuche mit künstlichen Netzwerken Aufschluß über die menschliche Lernfähigkeit geben sollten. So gehen die heute noch gebräuchlichen Lernregeln für konnektionistische Strukturen auf eine von dem Psychologen Donald O. Hebb 1949 vorgestellte Lernregel zurück. Auch heute werden in Teilen der Kognitionswissenschaften künstliche neuronale Netzwerke eingesetzt, um damit das Verhalten biologischer Gehirne zu erforschen. Diese Verbindungen zum menschlichen Gehirn sind hier nicht Gegenstand der Untersuchung. Im Gegensatz zur Fuzzy-Logik, bei der die Parallele zum menschlichen Denken gerade ein Teil des Anspruchs der damit entwickelten Technologie ist, spielt dieser Aspekt bei den konnektionistischen Systemen nur eine geringe Rolle. Zwar taucht das Leitbild der Entwicklung von Technologien mit menschlichen Fähigkeiten, z. B. zur Erkennung von Personen und Gegenständen, in der technisch orientierten Literatur zum Konnektionismus immer wieder auf. In diesem Zusammenhang wird auf die biologische Parallele jedoch meist nur verwiesen, ohne daß die Annäherung an das vermeintliche biologische Vorbild nennenswerte Auswirkungen auf die Vorgehensweise hat.

Das Forschungsfeld des Konnektionismus hat eine bewegte Entwicklung hinter sich.¹⁴⁹ In den 1950er Jahren lösten die ersten erfolgreichen Versuche mit den „lernenden Maschinen“ eine Euphorie aus, die zu einer raschen Expansion der konnektionistischen Forschung führte. Diese Entwicklung wurde jedoch durch eine einzige

147 Mit der Fuzzy-Logik hat die „neuronale“ Informationsverarbeitung jedoch die relative Toleranz gegenüber ungenauen Eingabedaten gemeinsam. Daher werden die beiden Ansätze auch zusammen unter „Soft-Computing“ gefaßt. Vgl. Nauck (1996, S. vi).

148 Vgl. Zell (1994, S. 51 und 53) und Nauck (1996, S. 2).

149 Zu der Entwicklungsgeschichte des Konnektionismus vgl.: Zell (1994, S. 28 ff.), Wassermann (1989, S. 3 ff.), Nauck (1996, S. 14 ff.) und dort auch die entsprechenden Literaturverweise auf die Klassiker dieses Feldes.

Veröffentlichung jäh gebremst.¹⁵⁰ Hier wurde nachgewiesen, daß die bis dahin üblichen konnektionistischen Systeme nur eine sehr beschränkte Art von Problemen repräsentieren können. Darüber hinaus erklärten die Autoren jede Weiterentwicklung zur Überwindung dieser Beschränkungen für aussichtslos. Daraufhin wurden ein Großteil der Forschungsgelder in diesem Bereich gestrichen. Das Interesse an konnektionistischen Systemen erlosch und wurde stattdessen der Forschung zur symbolischen Künstlichen Intelligenz zuteil. Erst in den 1980er Jahren erfolgte ein neuerlicher Aufschwung. Mittlerweile waren Verfahren entwickelt worden, mit denen die früheren Beschränkungen überwunden werden konnten. Heutzutage ist der Konnektionismus ein großes Forschungsgebiet, an dem neben der Informatik, von der Elektrotechnik bis zu den Kognitionswissenschaften sehr unterschiedliche Fächer beteiligt sind.¹⁵¹

3.6.2 Netz-Typisches und Netz-Typen

In diesem Abschnitt sollen einige wesentliche Aspekte des technikwissenschaftlichen Einsatzes konnektionistischer Verfahren geschildert werden. Dabei besteht keinesfalls der Anspruch, eine auch nur annähernd vollständige Darstellung des Konnektionismus oder detaillierte Beschreibungen einzelner konnektionistischer Systeme zu liefern.

Grundprinzipien konnektionistischer Systeme

Konnektionistische Systeme bestehen aus einer Vielzahl von Einheiten, den „Neuronen“, die miteinander über Verbindungen unterschiedlicher Stärke verknüpft sind.¹⁵² Werden einzelne dieser Prozeßeinheiten von außen mit Information beaufschlagt, leiten sie an die anderen Einheiten Signale weiter. Darauf reagieren diese wiederum mit der Aussendung neuer Ausgangssignale, so daß sich der Zustand des gesamten Netzes auf eine charakteristische Art und Weise verändert. Wie diese Veränderung beschaffen ist, hängt vor allem von der Stärke der Verbindungen zwischen den Neuronen, den sogenannten „Gewichten“, ab. Durch wiederholtes Präsentieren bestimmter Daten und gezielte Veränderung der Gewichte in Abhängigkeit von der Netzausgabe, können Zusammenhänge zwischen Datensätzen „gelernt“ werden. „Lernen“ in einem konnektionistischen System ist also nichts anderes als die Einstellung der Stärke der Verbindungen zwischen den Prozeßeinheiten nach einem definierten Algorithmus – der „Lernregel“. Ist die „Trainingsphase“, wie der Lernvorgang auch bezeichnet wird, abgeschlossen, hat das Netzwerk bestimmte Zusammenhänge zwischen Datensätzen in seiner Struktur gespeichert. Die Fähigkeit auf diese Weise Zusammenhänge zu „Lernen“, ist allen konnektionistischen Systemen gemeinsam. Für das „Training“ werden keine expliziten Regeln über das untersuchte Problem benötigt, es muß lediglich eine ausreichende Menge geeigneter „Trainingsdatenpaare“ vorhanden sein. Die Modellierung von Welt über konnektionistische Systeme kann somit als ein induktives Verfahren – d.h. eine Hypothesenbildung aus Einzelbeispielen – verstanden werden.

Nach dem „Lernvorgang“ bildet das Netzwerk ein Abbild eines in der Welt „vorgefundenen“ Zusammenhanges zwischen Daten und damit ein Black-Box Modell¹⁵³ eines bestimmten Ausschnittes von Wirklichkeit. Da die Modellinformation über die ganze Netzwerkstruktur verteilt gespeichert ist, ohne daß etwa angegeben werden könnte,

¹⁵⁰ Minsky/Papert (1969).

für welche Information ein einzelnes Neuron oder eine einzelne Verbindung zuständig ist, wird diese Art der Informationscodierung als „verteilte Wissensrepräsentation“ bezeichnet.¹⁵⁴ Da in einem solchen Modell keine expliziten Regeln an definierbaren Orten abgelegt sind, sprechen einige Autoren von „subsymbolischen“ Modellen¹⁵⁵ und einer „impliziten Codierung“ der Lösung einer Aufgabenstellung.¹⁵⁶

Typen konnektionistischer Problemstellungen

Konnektionistische Systeme lassen sich in vielerlei Hinsicht unterscheiden. So gibt es eine große Zahl unterschiedlicher Netzwerkstrukturen und Lernverfahren. Hier soll zunächst eine Unterscheidung nach den Problemtypen, denen mit konnektionistischen Strukturen zu Leibe gerückt wird, getroffen werden.

Ein sehr wesentliches Anwendungsgebiet konnektionistischer Systeme ist die *Klassifikation*. Hierbei besteht die Aufgabe des Systems darin, einer Eingabe einen übergeordneten Begriff, eine Kategorie, zuzuweisen.¹⁵⁷ Häufig wird die Eingabe als Muster und die Netzaufgabe als *Musterverarbeitung* bezeichnet. Viele technische Problemstellungen lassen sich auf solche Klassifizierungsaufgaben oder Musterverarbeitungen zurückführen. Typische Anwendungen im Bereich der industriellen Fertigung sind Systeme zur Fehlerdiagnose z. B. bei der Prüfung gefertigter Baugruppen.¹⁵⁸ Auch die Objekt-Erkennung mit der Hilfe von konnektionistischen Systemen wird für technische Zwecke, wie etwa für den Betrieb von Industrierobotern, eingesetzt. Obwohl damit eine Reihe interessanter technischer Anwendungen konnektionistisch durchgeführter Klassifizierungen vorliegen, wird der Schwerpunkt dieser Untersuchung nicht in diesem Umfeld liegen. Im Mittelpunkt der folgenden Überlegungen

151 Entsprechend vielfältig ist auch die einführende und spezialisierte Fachliteratur. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit sollen hier einige Veröffentlichungen genannt werden, die in den folgenden Ausführungen herangezogen werden:

Eine ausführliche deutschsprachige Einführung liefert Zell (1994) mit seinem Buch „Simulation Neuronaler Netze“. Hier sind alle wesentlichen Netzarchitekturen und Lernverfahren gut verständlich mit ihrem mathematischen Hintergrund geschildert. Zell geht auch recht ausführlich auf die biologische Motivation „Neuronaler Netze“ ein. Er beschreibt einige Anwendungen aus verschiedenen Bereichen (Physik, Chemie, Texturanalyse, Steuerung) und widmet sich detailliert der Software und Hardware Realisierung.

Ein weiteres Grundlagenwerk ist „Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme“ von Nauck u. a. (1996). Auch hier werden die wesentlichen Grundlagen konnektionistischer Systeme beschrieben. Der Fokus ist jedoch stärker auf den Aspekt der Wissensverarbeitung gerichtet als bei Zell. Der Konnektionismus wird hier vor dem Hintergrund anderer Formen von Wissensverarbeitung (klassische KI, Fuzzy-Systeme) behandelt. Dadurch treten spezifische Merkmale dieser verschiedenen Ansätze von Weltverarbeitung in den Vordergrund, die auch in dieser Untersuchung angesprochen werden.

Sehr speziell mit dem in dieser Arbeit zu untersuchenden Anwendungsfeld konnektionistischer Systeme, nämlich der Nachbildung von Weltausschnitten zum Zwecke der technischen Verarbeitung, beschäftigt sich „Artificial Neural Networks for Modelling and Control of Non-Linear Systems“ der belgischen Regelungstechniker Suykens u. a. (1996). Diese Analyse ist extrem abstrakt gehalten und daher nur für mathematisch bewanderte Leserinnen zu empfehlen. Das Buch enthält praktisch keine Anwendungsbeispiele. Dennoch ist es für diese Untersuchung interessant, da es die „Künstlichen Neuronalen Netzwerke“ in den Kontext klassischer Identifikationsverfahren für nichtlineare Systeme stellt.

Ein praxisorientiertes, ingenieurwissenschaftlich geprägtes Buch ist „Neuronale Netze in der Automatisierungstechnik“. Diese Sammlung von Beiträgen verschiedener, mit der Thematik beschäftigter Ingenieure wurde von Sigrid Hafner (1994) für die VDI/VDE-Gesellschaft Meß- und Automatisierungstechnik herausgegeben. Die Beiträge nennen zwar einige konkrete Anwendungen, sind aber im wesentlichen als Überblicksdarstellungen ganzer Anwendungsbereiche (z. B. Robotertechnik, Diagnosesysteme, Bildverarbeitung und eben auch Modellierung und Regelung) konzipiert. Das Buch ist daher für einen Einstieg in die ingenieurwissenschaftliche Seite der Thematik sehr gut geeignet. Die Darstellungen sind gut verständlich und sinnvoll bebildert.

wird stattdessen der Anwendungsbereich konnektionistischer Systeme stehen, in dem auch die Finite-Elemente Methode und die Fuzzy-Logik agieren: Die Modellierung dynamischer Systeme. Die „Neuro-Modelle“¹⁵⁹ dynamischer Systeme dienen, ebenso wie die anderen bisher beschriebenen Modelle, der technologischen Weiterverarbeitung der modellierten Weltausschnitte. Wie jedes dieser Instrumente bieten sie technischer Intervention in die Welt spezifische Angriffspunkte und bringen dabei spezifische Umordnungen soziotechnischer Strukturen mit sich. Die Fokussierung des Blicks auf den gemeinsamen Anwendungsbereich der Modellierung dynamischer Systeme soll es ermöglichen, im Anschluß an die Einzeluntersuchungen durch einen Vergleich der Ergebnisse Erkenntnisse über grundlegende Zusammenhänge zwischen technikwissenschaftlicher Formalisierung und soziotechnischen Umstrukturierungen zu gewinnen. Zunächst gilt es jedoch hier, die charakteristischen Eigenschaften konnektionistischer Umstrukturierung von Wirklichkeit herauszuarbeiten. Bevor zu diesem Zweck in Abschnitt 3.6.3 genauer beschrieben wird, wie mit konnektionistischen Systemen Weltausschnitte „identifiziert“ werden, sollen noch einige grundlegende Eigenschaften und Unterscheidungsmerkmale dieser Netzwerke vorgestellt werden.

Netzwerkstrukturen

Jedes konnektionistische System besteht aus einer Anzahl miteinander verbundener Prozeßeinheiten – den „Neuronen“. Jede dieser Einheiten empfängt Eingangssignale, transformiert diese und leitet ein Ausgangssignal weiter.

Die ersten konnektionistischen Systeme bestanden tatsächlich aus einzelnen solcher Prozeßeinheiten. Ein Neuronales Netz im heute üblichen Sinne entsteht aber erst durch die Zusammenschaltung mehrerer Schichten solcher Einheiten. Meist leiten die Prozeßeinheiten der „Eingabeschicht“ die Eingangsdaten lediglich an die „verdeckten Neuronen“, die in mehreren „verdeckten Schichten“ angeordnet sein können, weiter. Die Verknüpfung der einzelnen Schichten kann unterschiedlich beschaffen sein. Man unterscheidet z. B. Netze mit und ohne Rückkopplung (d.h. Rückführung des Ausgangssignals eines Neurons in vorherige Signalverarbeitungsstränge). Netze ohne Rückkopplung werden auch als Feedforward-Netze bezeichnet. Weiterhin lassen sich mehrschichtige und einschichtige Netzwerke, sowie unterschiedliche Grade an Vollständigkeit der Verbindungen unterscheiden.

152 Im folgenden wird lediglich das abstrakte Prinzip solcher Netzwerke geschildert. Die konkrete Umsetzung dieser Form von Informationsverarbeitung kann auf sehr verschiedene Weise geschehen. Üblich ist es, das konnektionistische System durch entsprechende Programmierung auf einem gewöhnlichen Computer nachzubilden. Diese Vorgehensweise wird häufig als „Simulation“ oder „Software Simulation“ Neuronaler Netze bezeichnet. Es gibt jedoch auch spezielle Hardwarekomponenten, wie Neurocomputer oder Neurochips, mit denen die parallele Struktur nachgebaut wird (vgl. Zell 1994, Kapitel 32 und 33). In frühen Versuchen, wie etwa dem 1957/58 am MIT entwickelten „Mark I Perceptron“, wurden die gewichteten Verbindungen durch Potentiometer realisiert. Später wurden spezielle Neuro Transistoren entwickelt (vgl. ebd., S. 28 ff.).

153 Zu dem Begriff des Black-Box Modells vgl. Abschnitt 1.3.1.

154 Vgl. Zell (1994, S. 27).

155 Hoffmann (1993, S. 12).

156 Nauck u. a. (1996, S. 3).

157 Vgl. Nauck u. a. (1996, S. 195).

158 Vgl. zu diesem Anwendungsbereich Schöneburg (1993). Hier werden einige konkrete Systeme wie z. B. Motorenprüfstände oder die Analyse von Bildern zur Prüfung von Oberflächen beschrieben. Zell (1994) beschreibt u. a. die Qualitätsanalyse von Natursteinplatten (S. 528 ff.).

159 Diesen von Froese/Vollmer (1995, S. 1008) übernommenen Begriff werde ich im folgenden ohne Anführungszeichen verwenden.

Lernalgorithmen

Ein wesentliches Merkmal zur Unterscheidung konnektionistischer Systeme ist das Lernverfahren. Dieses gibt an, nach welchen Regeln in der Trainingsphase des Netzwerkes die Stärke der Verbindungen zwischen den Prozeßeinheiten eingestellt wird. Man unterscheidet „Überwachtes Lernen“, „Unüberwachtes Lernen“ und „Verstärkendes Lernen“.

Bei überwachtem Lernen muß eine „feste Lernaufgabe“¹⁶⁰ vorliegen. Diese wird von einem Satz Eingangsdaten mit den dazugehörigen korrekten Ausgangsdaten gebildet. Die Verstellung der Gewichtungen erfolgt nach einem Algorithmus in Abhängigkeit von dem Fehler also dem Unterschied zwischen Soll- und Ist-Ausgang des Netzes. Dieser Lern-Algorithmus „überwacht“ damit Erfolg und Fortgang des „Lernens“. Die hier besonders interessierende Nachbildung verschiedener Werteverläufe, wie sie dynamische Systeme produzieren, stellt eine feste Lernaufgabe dar, die durch überwachtes Lernen gelöst wird.

Bei „unüberwachtem Lernen“ liegt eine „freie Lernaufgabe“ vor. Das bedeutet, daß zum „Training“ des Netzwerkes nur Eingangsdaten vorliegen. Ziel des „Lernens“ ist es dann, daß diese in Gruppen ähnlicher Eigenschaften (cluster) sortiert werden. Aus mathematischer Sicht extrahiert der Trainingsprozeß beim unüberwachten Lernen die statistischen Eigenschaften der Eingangsmenge.¹⁶¹ Für das unüberwachte Lernen existieren spezielle Netzwerktypen, die die Cluster der Daten in ihrer Topologie abbilden könne. Solche Netzwerke sind die Selbstorganisierte-Karte (SOM), die auch als Kohonen Netz bezeichnet wird¹⁶², und die Netzwerke der ART (Adaptive Resonance Theory) Familie.¹⁶³

Eine Mischform zwischen unüberwachtem und überwachtem Lernen ist das „Verstärkende Lernen“ (Reinforcement). Hier gibt es einen Überwachungsmechanismus, der lediglich bewertet, ob eine Veränderung positive oder negative Auswirkungen hat.

Jeder der vorgestellten Lernalgorithmen besteht aus einer großen Zahl einzelner Rechenschritte, die immer wieder nacheinander vollzogen werden müssen. Das „Lernen“ kann daher sinnvoll nur mit der Hilfe eines Computers durchgeführt werden.

Das Multilayer-Perceptron und der Backpropagation Algorithmus

Der für die hier interessierenden Netzanwendungen gebräuchlichste Typ eines konnektionistischen Systems ist das sogenannte Multilayer-Perceptron, das auch als Backpropagation-Netzwerk bezeichnet wird.

160 Nauck u. a. (1996, S. 29).

161 Vgl. Zell (1994, S. 96).

162 Ebd. S. 179 ff.

163 Ebd. S. 251 ff.

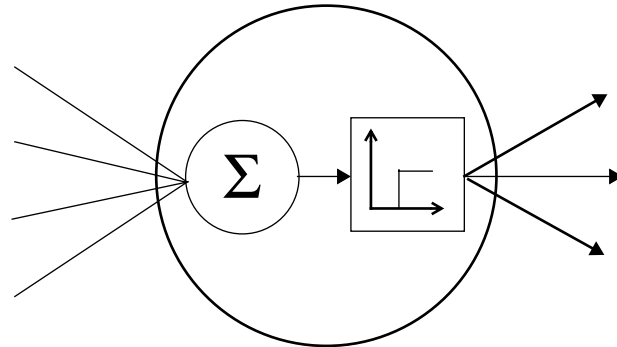


Abbildung 7 Typische Prozeßeinheit eines Multilayer-Perceptrons.

Die Architektur dieses Systems und auch das zugehörige Trainingsverfahren – der Backpropagation Algorithmus – sollen hier näher beschrieben werden. Eine typische Prozeßeinheit des Multilayer-Perceptrons zeigt Abbildung 7. Die Eingangssignale werden summiert, auf die Summe wird eine nichtlineare, stetige und differenzierbare Funktion angewendet und das Ergebnis wird dann als Ausgangssignal weitergeleitet. In einem Multilayer-Perceptron sind solche Einheiten in mehreren Schichten angeordnet (vgl. Abbildung 8). Die inneren Schichten bezeichnet man als verdeckte Schichten und deren Prozeßeinheiten als verdeckte Neuronen. Die Verbindungen zwischen den Schichten sind nur vorwärtsgerichtet, es handelt sich also um ein Feedforward-Netzwerk. Jede Verbindung ist mit einem Faktor gewichtet. Diese Gewichte werden beim „Lernen“ eingestellt. Die ersten Perceptrons besaßen nur eine einzige Schicht und wurden mit einer Fortentwicklung der „Hebbschen Lernregel“ trainiert.¹⁶⁴ Diese Netzwerke konnten jedoch nur wenige Probleme repräsentieren. Multilayer-Perceptrons mit verdeckten Schichten jedoch sind „universelle Approximatoren“, d.h. sie können jede beliebige Funktion darstellen. Voraussetzung ist allerdings, daß genügend verdeckte Einheiten vorhanden sind. Die Entwicklung eines Trainingsverfahrens für mehrschichtige Perceptrons war daher ein wichtiger Schritt für die konnektionistische Forschung. Der Backpropagation Algorithmus ist ein überwachtes Lernverfahren.¹⁶⁵ Die Ausgangswerte des Netzes werden mit den Sollwerten (auch als „Targets“ bezeichnet) verglichen. Die Gewichte der Verbindungen werden dann in Abhängigkeit von der Differenz zwischen Sollwert und Istwert der Ausgangsgröße verstellt.¹⁶⁶ Kompliziert wird das Ganze, wenn verdeckte Einheiten behandelt werden sollen, für die kein Zielwert vorliegt. Hier muß der Fehler „zurücktransportiert“ werden (daher der Name „Backpropagation“). Das Training wird solange fortgesetzt, bis keine wesentliche Veränderung des Fehlers mehr eintritt (das Verfahren konvergiert). Ist der Fehler dann noch zu groß, muß neu trainiert wer-

¹⁶⁴ Die Hebbsche Lernregel besagt im Prinzip, daß Verbindungen immer dann verstärkt werden, wenn die Einheiten, die sie verbinden, gleichzeitig stark aktiviert sind (siehe Zell 1994, S. 84).

¹⁶⁵ Für eine ausführliche Herleitung und Erklärung des Backpropagation Algorithmus vgl. Zell (1994, S. 108 ff.).

¹⁶⁶ Dabei handelt es sich um ein Gradientenabstiegsverfahren. Das bedeutet, daß eine Fehlerfunktion minimiert wird, indem in Richtung ihrer Ableitung nach einem Minimum gesucht wird. Ein typisches Problem solcher Verfahren ist es, daß sie in einem lokalen „Fehlertal“ hängenbleiben und daher das globale Minimum nicht finden. Um dies zu vermeiden gibt es einige Modifikationen (vgl. Zell 1994, S. 110 ff.).

den. Das Training kann sehr lange dauern, ohne daß gesichert ist, ob der Algorithmus überhaupt je konvergiert.

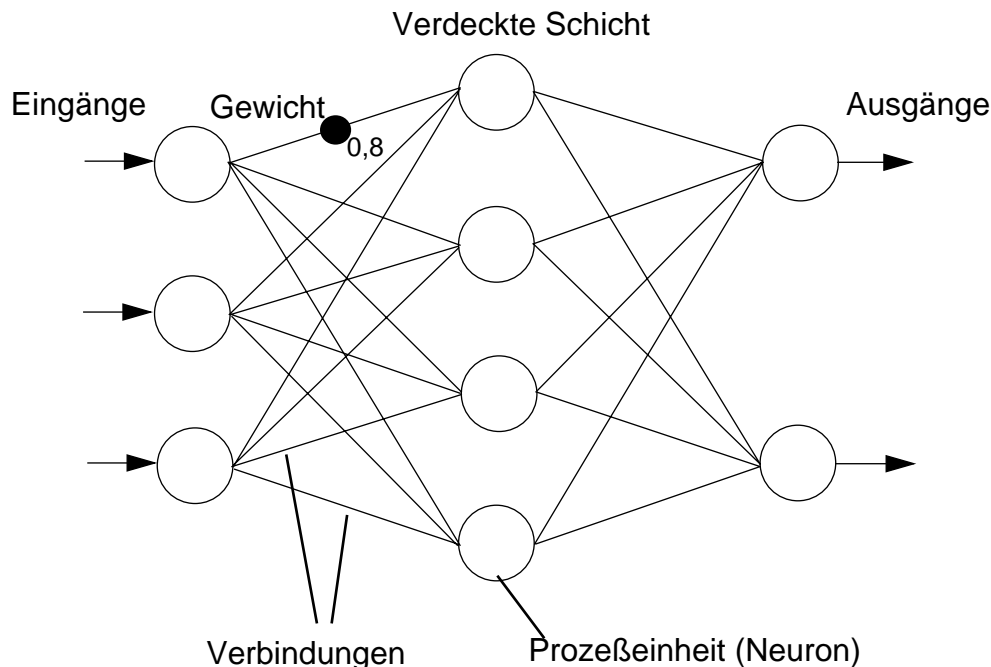


Abbildung 8 Multilayer-Perceptron mit drei Eingangsgrößen, zwei Ausgangsgrößen und einer verdeckten Schicht. Der Übersicht halber ist nur ein Gewichtungsfaktor dargestellt. In Wirklichkeit ist jede Verbindung gewichtet.

3.6.3 Die Welt im Netz

3.6.3.1 Netzbildung als Systemidentifikation

Weiter oben wurde als Schwerpunkt dieser Untersuchung der Einsatz konnektionistischer Systeme zur Modellierung dynamischer Systeme genannt. In diesem Abschnitt soll nun näher ausgeführt werden, wie diese Anwendung vor sich geht. Dazu werden die Funktionsapproximation und die Systemidentifikation als zwei verwandte Anliegen technikkwissenschaftlicher Formalisierung vorgestellt. Dann wird beschrieben, wie die Neuro-Modelle in diesem Zusammenhang eingesetzt werden können.

Universelle Approximation

Universelle Approximatoren sind mathematische Konstrukte, die sich beliebigen Funktionsverläufen anpassen lassen. Das Fuzzy-Symbolsystem ist ein solcher universeller Approximator, der auf der Basis sprachlich gefaßter Regeln gebildet wird.¹⁶⁷ Konnektionistische Systeme dagegen approximieren beliebige Funktionsverläufe über die Verstellung der Parameter einer signalverarbeitenden Struktur. Sie „lernen“, wie es oben beschrieben wurde, einen vorgegebenen Funktionsverlauf über die Adaption der Gewichte, ohne daß – wie bei den Fuzzy-Methoden – von irgendwelchen Regeln über das System ausgegangen wird. In der Mathematik ist die Darstellung von Funktionsverläufen mit mehreren Variablen durch eine Kombination von Funktionen mit nur einer Variable schon 1900 von Hilbert als Problem formuliert und in der Folge

¹⁶⁷ Zur Fuzzy-Approximation vgl. Abschnitt 3.5.9.

von zahlreichen Mathematikern behandelt worden. Später wurde gezeigt, daß konnektionistische Systeme eine solche Zerlegung repräsentieren und damit unter bestimmten Voraussetzungen jede kontinuierliche Funktion approximieren können. Die Bedeutung universeller Approximation für die technische Behandlung physikalischer Prozesse wurde schon im Zusammenhang mit der Fuzzy-Logik angesprochen.¹⁶⁸ Man geht dabei davon aus, daß zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen des Prozesses, der technisch verarbeitet werden soll, ein funktionaler Zusammenhang besteht. Diese Funktion ist jedoch unbekannt und auch nicht mit vertretbarem Aufwand durch die Anwendung naturwissenschaftlichen Wissens herzuleiten. Daher versucht man, sie mit einem „universellen Approximator“ nachzubilden. Funktionsapproximation ist damit eine Methode zur Verhaltensnachahmung und liefert daher stets Black-Box Modelle.

Systemidentifikation

In der Technikentwicklung stellt sich häufig die Aufgabe, daß aus Messungen der Ein- und Ausgangsgrößen eines technischen Systems verallgemeinerbare Aussagen über das Systemverhalten abgeleitet werden sollen. Diese Problemstellung wird mit Methoden der „Systemidentifikation“ behandelt. Statt, wie bei der analytischen Modellierung, von einer Beschreibung der Wirkungsprinzipien auszugehen, die einem Prozeß zugrundeliegen, versucht man bei der Systemidentifikation, aus den vorhandenen Meßwerten mathematische Zusammenhänge zu bilden. Ein solches Vorgehen ist in der Technikentwicklung immer dann von Interesse, wenn Vorgänge formalisiert werden sollen, über die sehr wenig oder gar kein explizites Wissen vorliegt, oder wenn die Zusammenhänge mathematisch besonders schwierig zu behandeln sind. Eine Systemidentifikation umfaßt, wie jede Modellierung, die beiden Schritte „Strukturidentifikation“ und „Parameteridentifikation“. Erstere bezeichnet die Ermittlung der Modellstruktur, letztere die Belegung der Modellparameter mit konkreten Zahlenwerten.¹⁶⁹

In den Technikwissenschaften existiert eine Vielzahl von klassischen Ansätzen zur Systemidentifikation. Obwohl die meisten realen Prozesse nichtlinearer Natur sind, werden sehr häufig lineare Methoden der Systemidentifikation eingesetzt. Dies ist z. B. dann möglich, wenn das Systemverhalten nur in einem kleinen Bereich, meistens um einen Arbeitspunkt herum, beschrieben zu werden braucht. In solchen Fällen wird eine Linearisierung vorgenommen. Es gibt jedoch auch Verfahren zur nichtlinearen Systemidentifikation. Dabei muß stets eine Vorannahme über die Art der Nichtlinearität getroffen werden. Man spricht von einer Vorwahl der Modellklasse. An diesem Punkt fließt bei solchen Ansätzen das qualitative Wissen der an der Modellierung beteiligten Personen ein. Gerade dieser von außen eingebrachte „Bias“ steigert die Aussagekraft eines Modellansatzes indem er die Universalität des Modells einschränkt.

Ein zentrales Problem jeder Systemidentifikation ist die richtige Auswahl der Meßwerte. Damit aus diesen verwertbare Aussagen gewonnen werden können, muß der Prozeß auch die Zustände einnehmen, in denen er relevante Daten produziert. Um dies zu erreichen, können die Prozesse gezielt „angeregt“ werden. Dieses Vorgehen

¹⁶⁸ Vgl. Abschnitt 3.5.9.

¹⁶⁹ Vgl. auch Abschnitt 3.2.

bezeichnet man als „experimentelle Modellbildung“. Manche Vorgänge sind „nicht beobachtbar“ und damit einer Systemidentifikation nur schwer zugänglich.

Systemidentifikation ist keine notwendige Voraussetzung, um überhaupt einen komplexen Prozeß zu betreiben oder auch zu beeinflussen. Dies kann auch auf der Basis von Erfahrungswissen oder durch systematische Versuche geschehen. Für manche Steuerungsverfahren reicht es, durch gezielte Anregung des Prozesses einige Kenngrößen zu ermitteln. Eine detaillierte Systemidentifikation ist jedoch immer dann notwendig, wenn eine modellbasierte Beeinflussung des Prozesses stattfinden soll. Davon versprechen sich die Anwender meistens bessere Kontrolle, genauere Führung und optimale Ressourcen Ausnutzung.

Das Neuro-Modell als universeller Approximator

Die beschriebene Problemstellung der Systemidentifikation kann auch als die Suche nach einer Funktionsapproximation, wie sie oben geschildert wurde, begriffen werden. Wenn ein universeller Approximator eingesetzt wird, um den Zusammenhang zwischen den vorhandenen Daten nachzubilden, ist es nicht mehr nötig, vor Beginn der Identifikation Eingrenzungen der Modellklasse vorzunehmen. Hier kann theoretisch jede beliebige Abbildung von Ein- auf Ausgangsdaten realisiert werden, ohne daß qualitative Vorannahmen getroffen werden müssen. Konnektionistische Systeme identifizieren dynamische Systeme indem sie, wie es oben beschrieben wurde, Zusammenhänge zwischen den vorliegenden Meßdaten „lernen“. Nach dieser Anpassung fungieren die Netzwerke dann als Modelle der identifizierten Prozesse. Diese Neuro-Modelle können in ähnlich raffinierte Steuerungskonzepte wie klassische schwarze und weiße Modelle eingebunden werden und erfüllen damit das Anliegen nach differenzierterem Zugriff auf technische Systeme. Dabei hat die typisch konnektionistische Form der „wissensfreien“ Systemidentifikation gegenüber klassischen Verfahren einige Vorteile. So formulieren etwa Neumerkel und Lohnert (1994, S. 31):

*„Künstliche Neuronale Netze (KNN) bieten eine Reihe von Eigenschaften, die sie für die Aufgabe der **Prozeßmodellierung** als eine sehr geeignete Technik erscheinen lassen. KNN sind in der Lage, allein aus Beobachtungen des Prozesses dessen Verhalten anzunehmen, indem sie das Ein/Ausgangsverhalten kopieren. Da die Kenntnis der inneren Prozeßvorgänge dabei keine notwendige Voraussetzung darstellt, kann die Modellierung mit einem Minimum an a-priori-Wissen auskommen. [...] Die Vorteile der neuronalen Modellierungstechnik können in Verbindung mit modellbasierten Reglerstrukturen auch für die **Prozeßregelung** ausgenutzt werden“*

Gleichzeitig handelt sich die technologische Verarbeitung der Welt, wie in Abschnitt 3.6.3.3 noch zu zeigen sein wird, mit zunehmender Universalität der eingesetzten Verfahren auch Nachteile ein. Je weniger nämlich an spezifischer Bedeutung in ein Modell eingeflossen ist, desto weniger ist das Modell fähig, „bedeutungsvoll“ zu agieren.

3.6.3.2 Netzpraxis

Bevor in Abschnitt 3.6.4 näher untersucht wird, welche Dekontextualisierungen und Rekonfigurationen involviert sind, wenn die Welt „ins Netz geht“, werden hier einige Anwendungsbeispiele vorgestellt. Dadurch soll verdeutlicht werden, wie das Verfahren der Systemidentifikation mittels universaler Approximation durch konnektionistische Systeme zur technischen Verarbeitung von Welt eingesetzt wird.

Ein Netz aus Stahl

Das im folgenden erläuterte Anwendungsbeispiel wurde von Keuthen u. a. (1995) auf der EUFIT (European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing) in Aachen vorgestellt. Die folgenden Ausführungen sind dem Tagungsband entnommen, alle Seitenangaben beziehen sich auf diese Veröffentlichung.

Der untersuchte Prozeß ist das Stahlkochen in einem BOS (Basic Oxygen Steelmaking)¹⁷⁰ Ofen. Beim Stahlkochen wird Roheisen in Stahl umgewandelt. Dazu müssen vor allem der Kohlenstoffgehalt gesenkt und unerwünschte Bestandteile des Roheisens, wie Silicium, Mangan und Phosphor entfernt werden. Dies geschieht durch Verbindung mit Sauerstoff, also Oxydation („Frischen“). Dazu wird der Schmelze, der neben dem Roheisen auch Stahlschrott und Kalk zugesetzt wird, in einem speziellen Kessel, dem Konverter, über ein Kupferrohr, die Lanze, Sauerstoff zugeführt. Dieser verbindet sich mit dem Kohlenstoff und den Eisenbegleitern unter Abgabe von Wärme. Das Ziel jedes Stahlkochens ist es, daß am Ende des ungefähr 20 Minuten dauernden Prozesses eine Schmelze mit definierter Zusammensetzung und optimaler Temperatur vorliegt. Gelingt dies nicht, muß von neuem begonnen werden, was zu hohen Kosten und Zeitverlust führt. Zu hohe Temperaturen während des Prozesses führen zu einem erhöhten Verschleiß der Anlage (S. 305).

Das Problem ist nun zu entscheiden, in welcher Menge und Geschwindigkeit der Sauerstoff und die Zusätze zugeführt werden müssen, um den gewünschten Zustand zu erreichen. Hätte man ein analytisches Modell des Prozesses, also eine mathematische Beschreibung des Zusammenhangs zwischen den Eingangsgrößen (z. B. der Sauerstoffzufuhr) und den Ausgangsgrößen (z. B. der Temperatur im Kessel), so könnte direkt berechnet werden, welche Prozeßführung zu dem gewünschten Ergebnis führt. Daraus könnte dann eine angemessene Vorgehensweise für die Bedienung des Stahl-ofens entwickelt werden. Nun gibt es zwar einige Ansätze dazu, die thermodynamischen Zusammenhänge dieses Vorgangs in Gleichungen zu fassen. Da der Prozeß jedoch sehr komplex ist, konnte in der Praxis bisher kein wesentlicher Nutzen aus diesen analytischen Modellen gezogen werden (S. 305). Diese Situation ist typisch für die Anwendung eines Verfahrens zur Systemidentifikation. Statt dem Prozeß analytisch zu Leibe zu rücken, wird versucht, aus den vorhandenen Meßwerten mit rein mathematischen Methoden einen Zusammenhang zu konstruieren. Wichtig ist dazu aber, daß eine große Zahl von Informationen über tatsächliche Prozeßverläufe vorhanden ist. Dies ist beim Stahlkochen der Fall, da hier bei jedem Durchlauf routinemäßig viele Prozeßgrößen gemessen werden. In dem hier vorgestellten Projekt wurde nun versucht, diesen Prozeß mit Hilfe konnektionistischer Systeme zu identifizieren und auf der Basis dieser Ergebnisse seine Führung zu optimieren.

Ausgangspunkt war dabei das folgende, zuvor übliche Vorgehen bei dem Betrieb des Ofens:

Die Zufuhr des Sauerstoffs und der Zusätze wird nach einem groben Modell auf der Basis eines Gleichgewichts zwischen Wärme und Masse gesteuert. Nach einer gewissen Zeit wird mit einer zweiten Lanze eine Messung von Temperatur und Kohlenstoffgehalt durchgeführt und eine Probe aus der Schmelze entnommen. Wenn nach ca. 5 Minuten die Laboranalyse dieser Probe vorliegt, wird mit einem konventionellen

¹⁷⁰ Es handelt sich dabei um ein Sauerstoffaufblasverfahren.

mathematischen Modell eine Vorhersage über den Endzustand der Schmelze getroffen. Der Bediener der Anlage entschied dann aufgrund seiner Erfahrung, aber auch in Abhängigkeit davon, wie sehr es im jeweiligen Fall auf die einwandfreie Qualität des Ausgangsproduktes ankommt, ob der Kessel geöffnet wird. Ansonsten muß abgewartet werden, bis das Labor die Probe des Endzustandes analysiert hat. Dabei geht wertvolle Zeit verloren.

Aufgabe des zu entwickelnden konnektionistischen Modells soll es sein, schon vor dem Vorliegen des ersten Analyseergebnisses eine verlässliche Vorhersage über den Endzustand zu treffen, damit der Konverter so schnell wie möglich ausgekippt werden kann. Dies würde einige Kosten bei der Prozeßdurchführung sparen. Damit ein Neuro-Modell entwickelt werden kann, müssen zunächst aus den Meßdaten der vergangenen Prozesse Trainingsdaten gewonnen werden. Dabei wird zwischen „statischen Meßwerten“, die für jeden Prozeß nur einmal ermittelt werden, und „dynamischen Meßwerten“, die alle sechs Sekunden aufgenommen werden, unterschieden.

Folgende Parameter wurden als Eingangsgrößen für das konnektionistische Modell ausgewählt (S. 307):

Statische Meßwerte:

- Zusammensetzung des Roheisens
- Gewicht und Temperatur der Schmelze zu Beginn des Prozesses
- Menge der Zusätze (z. B. Schrott)
- Gewünschter Endzustand des Stahls
- Kohlenstoff-Gehalt und Temperatur aus der Zwischenmessung

Dynamische Meßwerte:

- Abgasgeräusche; Diese geben Auskunft über die Höhe der Schlacke und werden über ein Mikrophon im Abzug aufgenommen
- Höhe der Lanze
- Zusammensetzung des Abgases. Daraus kann die Geschwindigkeit des Kohlenstoffentzugs aus der Schmelze hergeleitet werden. Gemessen wird sie im Abzug des Konverters.

Folgende zu prognostizierende Größen bilden die Ausgangsgrößen des Netzwerkes:

- Zusammensetzung der Schmelze am Ende des Prozesses (Gehalt an Kohlenstoff, Schwefel, Mangan und Phosphor)
- Temperatur der Schmelze am Ende des Prozesses.

Es ergeben sich damit für das gesuchte Modell 43 Eingangsgrößen¹⁷¹ und 5 Ausgangsgrößen. Aus vergangenen Messungen lagen die Meßwerte für 1460 Prozesse vor.¹⁷² Davon wurden 70% zur Bildung der Trainings-Datensätze und der Rest als Testdaten verwendet. Für jeden Ausgang wurde ein Neuronales Netzwerk trainiert. Es

¹⁷¹ Die dynamischen Meßwerte werden einer Vorverarbeitung unterzogen.

¹⁷² Dies ist für KNN Anwendungen eine ungewöhnlich hohe Zahl. Oft wird mit weniger als hundert Trainings- und Testdatensätzen operiert.

wurden also fünf verschiedene konnektionistische Systeme entwickelt. Da Ein- und Ausgangsdaten vorliegen, wird ein überwachtes Lernverfahren angewandt (Backpropagation). Als Netztyp wurde ein Multilayer-Perceptron mit einer Schicht verdeckter „Neuronen“ ausgewählt, da sich diese Struktur in Versuchen mit mehreren Varianten am besten bewährt hatte. Nach dem Training wurde das fertige Neuro-Modell anhand der Testdaten bewertet. Es ergab sich eine zufriedenstellende Vorhersagegenauigkeit. Gegenüber dem konventionellen Modell wurde eine erhebliche Steigerung an Genauigkeit erreicht, obwohl die konnektionistischen Prognosen auf weniger Information beruhten, da die volle Analyse der Zwischenprobe nicht abgewartet wurde. Nur die Prognose des Schwefelgehalts konnte nicht verbessert werden. Die Autoren vermuten, daß dies an der mangelnden Information über den Schwefelgehalt des Roheisens liegt (S. 308 unten).

Die Autoren bezeichnen die Ergebnisse als ermutigend und schlagen vor, die gesamte Prozeßführung, also auch die Steuerung der Zufuhr von Sauerstoff und Zusätzen, auf der Basis der konnektionistischen Modelle vorzunehmen.

Zement und andere Netzangelegenheiten

Deigaard (1995) schildert den Einsatz eines konnektionistischen Modells für die Mühle einer Zementfabrik. In einer solchen Mühle werden ca. 300 t/h Rohmaterial für die Zementherstellung zermahlen. Das Ziel jeder Prozeßführung ist es, den enorm hohen Energieverbrauch zu minimieren. Gleichzeitig müssen als Bedingung niedrige Vibration, eine konstante Produktionsrate und ein gewisser Anteil an Restmahlgut eingehalten werden.

Für jede dieser vier Ausgangsgrößen wurde ein eigenes konnektionistisches Modell mit je 26 Eingängen (11 Meßgrößen zu zwei verschiedenen Zeitpunkten und die aktuellen Werte der vier Vorhersagegrößen) entwickelt. Als Netzwerk wurde ein Multilayer-Perceptron verwendet. Das Trainingsverfahren war Backpropagation. Als Struktur wurde eine verdeckten Schicht mit 6 Neuronen durch Ausprobieren als optimal gefunden. 415 Datenpaare wurden für Training und Testen verwendet. Dabei wurde eine zufriedenstellende Korrelation zwischen Vorhersage und Meßwert erreicht. Auf der Basis des Neuro-Modells wurde dann eine Optimierung der Prozeßparameter durchgeführt. Dabei wurden neue, sehr günstige Möglichkeiten gefunden, den Prozeß zu fahren. Diese Möglichkeiten waren den Operatoren zwar prinzipiell bekannt, es wußte aber niemand, wann und wie man diese anfahren sollte. Durch den Einsatz des konnektionistischen Modells konnte etwa 10% an Energie eingespart werden. Berichte über ähnliche Anwendung wie die geschilderten finden sich in recht großer Zahl. Einige seien hier noch in aller Kürze genannt:

- Schöllhorn (1997) beschreibt eine konnektionistische Modellierung des Mischens von Kraftstoff (Blending-Prozeß) in einer Raffinerie. Durch eine genauere Voraussage sollen Kosten gespart werden, die entstehen, wenn der Kraftstoff die Qualitätsanforderungen nicht einhält oder weit übertrifft.
- In Beaverstock (1993) wird die Reinigung des Rohmaterials in einer Papierfabrik mit konnektionistischen Systemen modelliert. Darauf aufbauend wird auch eine Optimierung der Prozeßführung entwickelt.
- Bhat u. a. (1990) treffen mit konnektionistischen Modellen Vorhersagen über die Konzentration der Ausgangsstoffe einer Reaktion in einem Rührkessel in Abhän-

gigkeit von der Zufuhrgeschwindigkeit und der Konzentration der Ausgangsstoffe. Außerdem wird ein neues Verfahren zur Messung von Konzentrationen vorgestellt, das auf Interpretation von Sensordaten (Fluoreszenzspektren) durch konnektionistische Systeme beruht.

- Reuter (1993) schlägt gleich eine Reihe von Anwendungen für konnektionistische Modelle auf metallurgische Prozesse vor. So schildert er z. B. die konnektionistische Modellierung der Eigenschaften einer Schlacke als Funktion ihrer Temperatur.
- Voutchkov (1997) modelliert die Reinheit des Wassers in einem Klärwerk als Funktion des Schlick-Flusses in den Tanks mit konnektionistischen Systemen.

Bei allen genannten Anwendungsbeispielen war es das Ziel, ein Modell für einen Prozeß zu erhalten, um diesen besser kontrollieren und beeinflussen zu können. Als Anliegen solcher Beeinflussung werden explizit aufgeführt: Senkung der Betriebskosten, Senkung der Ausschußrate, Erhöhung der Produktqualität, Senkung des Energieverbrauchs, Unabhängigkeit von Bedienpersonal (z. B. Schöllhorn 1997, S. 37).

Als Gründe für die Anwendung von konnektionistischen Modellen statt anderer Verfahren werden genannt:

- Über den Prozeß liegt kein explizites Wissen vor.
- Die Prozeßdynamik weist starke Nichtlinearitäten auf. Dadurch werden vor allem lineare Identifikationsverfahren unbrauchbar.
- Der Prozeß enthält sehr viele Einflußgrößen (Parameter).
- Der Prozeß verändert sich mit der Zeit, so daß ein Modell benötigt wird, daß sich immer neu anpassen kann.
- Die Modellierung soll schnell und kostengünstig durchgeführt werden.

In allen Fällen wurde die beste Netztopologie durch Ausprobieren gefunden.

3.6.3.3 Lücken im Netz – Schwierigkeiten konnektionistischer Modellierung

Nach diesem kurzen Abriß konnektionistischer Theorie und dem Exkurs in die Anwendungswelt von Neuro-Modellen kann folgendes festgehalten werden:

Die Modellierung von Welt über konnektionistische Modelle kann in gleicher Weise wie die bisher behandelten Modellierungsverfahren als Instrument zum Eingriff in die Welt verstanden werden. Die technisch zu verarbeitenden Ausschnitte von Welt sollen auf eine Weise formalisiert werden, die sie einer möglichst gezielten und effektiven Beeinflussung zugänglich machen. Typisch für die Neuro-Modelle ist es, daß die Formalisierung über ein „Lernen“ aus Beispielen und nicht über eine Herleitung aus Prinzipien geschieht. Die Neuro-Modelle sind absolute Black-Box Modelle, der zu formalisierende Prozeß wird „vermessen“ statt analysiert. Wenn kein Wissen über einen Prozeß vorhanden ist, wie etwa bei dem beschriebenen Reaktionsvorgang im Stahlofen, bieten konnektionistische Modelle daher eine Möglichkeit, den Vorgang dennoch zu formalisieren. Diese Vorgehensweise kann auch dann günstig sein, wenn eine analytische Modellierung zwar möglich, aber wegen der Kompliziertheit der Zusammenhänge langwierig und damit teuer wäre. Konnektionistische Modellierung hat aber aus der Perspektive der Technikentwicklung ihre spezifischen Probleme. Auf

diese soll im folgenden eingegangen werden, da sich daraus Hinweise darauf ergeben, daß auch die Identifizierung von Welt über ihre Nachahmung nicht ohne zweckgerichtete Zurichtung vor sich gehen kann. Zudem finden sich die Auswirkungen der hier geschilderten Charakteristika konnektionistischer Formalisierung in der Funktionsweise der „neuronalen Artefakte“ und ihrem Zusammenwirken mit ihrer Umgebung, wie sie in Abschnitt 3.6.6 analysiert werden, wieder.

Das zentrale Problem konnektionistischer Modellierung ist die Frage nach der Fähigkeit des Modells zur Generalisierung. Von dieser hängt es ab, wie das Neuro-Modell auf Eingaben reagiert, die nicht Teil der Lerndaten waren.¹⁷³ Die Schwierigkeit dabei ist, daß nicht sicher festgestellt werden kann, ob das Neuro-Modell bei dem „Lernen aus Beispielen“ überhaupt das dem Prozeß zugrundeliegende Abbildungsverhältnis erfaßt und damit die Struktur des Systems identifiziert hat. Im Extremfall kann das Netzwerk nur ein Speicher aller im Training beteiligten Lernmuster darstellen. Diese Phänomen wird als „Überanpassung“ oder „Übergeneralisierung“ bezeichnet. Überanpassung tritt ein, wenn das Netz gegenüber dem Problem zu viele freie Parameter (also z. B. zu viele verdeckte Einheiten) hat, zu wenige Trainingsdaten verwendet wurde oder die Meßwerte sehr verrauscht sind. Dazu ein Anwender:

„if noisy signals are present, the network might „hunt“ small spikes with success, leading to a good fit, but one that has nothing to do with the cause and effect for which we are looking“. (Deigaard 1995, S. 971 Hervorhebung P.W.).

Die Fähigkeit zur Generalisierung ist bei einem überangepaßten Netz sehr gering. Neue Muster können nicht richtig verarbeitet werden. Um die Überanpassung zu vermeiden, muß die Anzahl der Neuronen möglichst gering gehalten werden. Ist das Netz andererseits zu klein, kann es ein Problem vielleicht nicht angemessen repräsentieren. In diesem Fall wird der Lernalgorithmus nicht „konvergieren“. Es kann daher bei der konnektionistischen Modellierung zu langwierigen „trial and error“ Verfahren kommen, in deren Verlauf die Netztopologie immer wieder abgeändert werden muß.

Während ein richtig dimensioniertes Netzwerk normalerweise in der Lage ist, so neue Eingaben innerhalb des Trainingsbereichs richtig zuzuordnen (Interpolation), ist es häufig damit überfordert, Eingaben zu behandeln, die außerhalb des trainierten Bereichs liegen (Extrapolation). Ein halbwegs zuverlässiger Betrieb eines Neuro-Modells ist daher nur im Trainingsbereich möglich. Das Problem des Gültigkeitsbereiches stellt sich hier somit gegenüber analytischer Modellierung in verschärfter Form. Zwar wird auch ein naturwissenschaftlich basiertes Modell immer stärkere Abweichungen von der beschriebenen Wirklichkeit aufweisen, je mehr sich diese aus dem Bereich, für den das Modell entwickelt wurde, entfernt. Ein vollkommenes Versagen bei einer leichten Abweichung, wie sie bei einem Neuro-Modell vorkommen kann, ist jedoch sehr unwahrscheinlich.¹⁷⁴ Zudem sind die Einschränkungen der Gültigkeit bei einem analytischen Modell zumindestens partiell bekannt, während bei dem Neuro-Modell völlig unklar ist, nach welchen Prinzipien die Informationen in der verteilten Struktur gespeichert wurden und wovon es abhängt, ob die Bedingungen des Trainings noch gegeben sind. So bemerken die Regelungstechniker Neumerkel und Lohnert (1994, S. 40):

¹⁷³ Vgl. Nauck u. a. (1996, S. 81) und Hoffmann (1993, S. 143).

¹⁷⁴ Bei chaotischen Systemen, die eine extreme Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen aufweisen, kann dies allerdings ebenfalls vorkommen.

„Ein Problem für die neuronale Modellierung entsteht, wenn es nicht möglich ist, Trainingsdaten gestreut über den gesamten Betriebsbereich zu gewinnen. Ob bei einer Extrapolation das neuronale Modell noch zuverlässige Ergebnisse liefert, läßt sich nicht garantieren. Bei einem zugrundeliegenden mathematischen Modell, das auf Prozeßwissen basiert, werden hingegen prozeßspezifische Parameter bestimmt, die den Prozeß auch außerhalb der zur Parameteridentifikation verwendeten Betriebszustände beschreiben, sofern das Modell auch dort zutreffend ist“

Ebenfalls mit der Verarbeitung neuer Muster hängt das sogenannte „Stabilitäts/Plastizitäts Dilemma“ zusammen. Während des Lernvorgangs soll sich das Neuro-Modell verändern, wenn es neue Muster präsentiert bekommt. Darin besteht ja gerade seine Lernfähigkeit. Andererseits führt diese „Plastizität“ dazu, daß das Modell schon gelernte Zusammenhänge „vergessen“ kann. Ein solches instabiles Verhalten stellt vor allem dann eine Gefahr dar, wenn das Modell auch im Betrieb noch lernfähig sein soll, wie es bei dem sogenannten „Online-Lernen“ oder „Training on the Job“ Verfahren der Fall ist. Dies wiederum ist aber gerade in einer der Situationen unvermeidlich, in der konnektionistische Modelle bevorzugt zum Einsatz kommen, wenn nämlich Systeme behandelt werden sollen, deren Parameter sich mit der Zeit verändern (zeitvariante Systeme). Daher führen Hafner u. a. (1994) als Nachteil konnektionistischer Modellierung an:

„Wenn ein System seine Lernfähigkeit während der Anwendungsphase beibehält (wie sehr oft notwendig), kann dessen Leistung gravierend beeinträchtigt werden, falls die vorgegebenen Daten nicht sorgfältig genug ausgewählt werden.“ (S. 27)

Ein weiteres Problem praktischer Anwendung von Neuro-Modellen ist deren Unzugänglichkeit für eine mathematische Analyse. Obwohl es sich bei den konnektionistischen Systemen im Sinne dieser Arbeit um mathematische Modelle handelt, ist eine mathematische Analyse des Modellverhaltens nicht möglich. Ursache dafür ist die verteilte Speicherung der Information in konnektionistischen Systemen. Für aus Neuro-Modellen abgeleitete Eingriffe in technische Systeme kann daher, ähnlich wie bei den Fuzzy-Modellen, kein mathematischer Nachweis darüber erbracht werden, daß das Systemverhalten stabil bleibt.¹⁷⁵ Wird das Modell nur für die Vorhersage verwendet, wie etwa bei dem beschriebenen Stahlofen, ist dies nicht so schlimm. Führt eine falsche Vorhersage hier zu einer Fehlentscheidung, muß eine Ofenfüllung vernichtet werden. Probleme treten aber dann auf, wenn auf der Basis eines Neuro-Modells eine automatische Regelung des betreffenden Prozesses stattfinden soll. Bei sicherheitsrelevanten, geschlossenen Regelungssystemen können konnektionistische Modelle daher nicht ohne Zusatzmaßnahmen eingesetzt werden.

Eine weitere Problematik teilen die Neuro-Modelle mit allen Black-Box Modellen. Ist nämlich schon explizites Wissen über das System oder Teile des Systems vorhanden, kann dieses nicht direkt in die Modellierung eingebracht werden.¹⁷⁶ Das „Lernen“ geschieht immer von einem vollkommen unwissenden Zustand aus (learning from

¹⁷⁵ Wassermann (1989, S. 9): „Unless every possible input is tried, there is no way to be certain of the precise output. In a large network such exhaustive testing is impractical and statistical estimates of performance must suffice“

¹⁷⁶ Das Wissen müßte dazu in Form von Beispielen vorliegen. Eine Transformation von regelhaftem Wissen in Beispielform ist jedoch nur sehr selten möglich. Diesem häufig beklagten Nachteil konnektionistischer Modellierung wird z. B. durch Kombinationen mit Fuzzy-Systemen begegnet.

scratch). Auf der anderen Seite ist es auch nicht möglich, das durch das „Lernen“ gewonnene Black-Box Modell sinnhaft zu interpretieren. Die konnektionistische Modellierung liefert daher zwar ein funktionierendes Modell, trägt aber nicht dazu bei, das Verständnis des modellierten Weltausschnittes zu verbessern.¹⁷⁷

3.6.4 Umordnungen im Konnektionistischen Computerlabor

Konnektionistische Modellierung gibt Anlaß zu Vermutungen, es handele sich um eine Verarbeitungsweise von Welt, die sich fundamental von der klassischen naturwissenschaftlich angeleiteten Weltbeschreibung unterscheidet. Statt zergliedernder Analyse komplexer Vorgänge und der damit einhergehenden notwendigen Vereinfachung und Reduktion, statt aufwendiger Anpassungsarbeit zwischen Modell und Wirklichkeit wird „nur“ gemessen und der Welt selber die Modellbildung überlassen. Die vorangegangene Auflistung einiger Schwierigkeiten, die mit dem praktischen Einsatz konnektionistischer Modellierung einhergehen, hat jedoch gezeigt, daß dynamische Systeme nicht ohne weiteres „ins Netz gehen“. Zahlreiche Maßnahmen müssen getroffen werden, damit ein konnektionistisches Modell die interessierenden Zusammenhänge in der gewünschten Weise repräsentieren kann. Gleichzeitig müssen auch die zu beschreibenden Systeme auf spezielle Weisen zugerichtet werden, um die konnektionistische Modellierung zu ermöglichen. Auch der Neuro-Computer kann daher als ein Labor betrachtet werden, in dem eine Rekonfiguration von Weltausschnitten stattfindet, die auch außerhalb der Laborumgebung Umstrukturierungen nach sich zieht. Jeder Schritt der Übersetzung von Welt in ein Neuro-Modell vermischt soziale, materielle und symbolische Strukturen auf neue Weise. Jede der im Verlauf der Modellierung getroffenen Entscheidungen wirkt sich bei der Implementation der Artefakte, die mit konnektionistischer Unterstützung entwickelt wurden, in einer charakteristischen Weise aus. Das „neuronale“ Artefakt kann nicht jede beliebige Umgebungsbedingung „lernen“ und zwingt damit zu einer Ausweitung des „Neuro-Labors“ auf die Welt. Damit läßt sich auch bei der konnektionistischen Modellierung der zu Beginn dieser Arbeit als Grundmuster jeder technischen Modellierung postulierte Stabilisierungsvorgang bestimmter soziotechnischer Strukturen nachzeichnen. Dabei ist es jedoch nicht müßig, den Eigenheiten des spezifischen Verfahrens noch weiter nachzugehen. Denn welche Muster sich überhaupt knüpfen lassen, wie Modell und Materie miteinander verwoben sind, hängt – das hat schon die Untersuchung der Fuzzy-Modellierung gezeigt – wesentlich von dem jeweiligen Modellierungsansatz ab. Daher soll die Skizze des konnektionistischen Rekonfigurationsvorgangs hier weiter präzisiert werden. Dazu wird zuerst auf die Dekontextualisierung und dann auf die weiteren Übersetzungsschritte eingegangen. Die Charakteristika konnektionistischer Laborausweitung werden in Abschnitt 3.6.6 behandelt.

3.6.4.1 Konnektionistische Dekontextualisierungen

In der Einführung zu dieser Arbeit wurde die Heraustrennung bestimmter Aspekte oder Bereiche von Welt zum Zwecke der Modellierung in den Technikwissenschaften als „zweckgerichtete Dekontextualisierung“ bezeichnet. Damit sollte hervorgehoben werden, daß hier – ebenso wie bei der Behandlung von Objekten im naturwissenschaftlichen Labor – nur diejenigen Aspekte der behandelten Weltausschnitte Beach-

¹⁷⁷ Im Gegensatz zu symbolisch codierten Systemen der Künstlichen Intelligenz ist keine „Introspektion“ möglich. Vgl. hierzu Zell (1994, S. 27), Nauck u. a. (1996, S. 3) und Wassermann (1989, S. 9).

tung finden, die mit dem Zweck der Modellierung in Zusammenhang stehen. Die Form der Abtrennung des zu modellierenden dynamischen Systems aus seiner Umgebung ist nicht durch ein allgemeines Interesse an einer möglichst umfangreichen Erkenntnis bestimmt, sondern richtet sich nach dem Verwertungsinteresse. Als ein Anliegen dieser Arbeit wurde es in der Einführung genannt herauszuarbeiten, wie diese technische Rekonstruktion von Welt bei der Anwendung von Computersimulation im Einzelnen vonstatten geht. Dabei geht es zum Einen darum, die Modellierungsschritte als zweckgebundene Übersetzungen zu kennzeichnen. Zum Anderen soll jedoch auch gefragt werden, an welchen Stellen und auf welche Weise Wissen über die Welt in die Modellierung eingeht und von welcher Art dieses Wissen ist. Für die konnektionistische Modellierung sind diese Fragen nicht auf den ersten Blick zu beantworten. Denn im Gegensatz zu naturwissenschaftlich begründeter Modellierung findet hier keine explizite Abgrenzung des betrachteten Systems und keine bewußte Auswahl einzelner Wirkungsprinzipien statt. Noch nicht einmal die bei anderen Identifikationsverfahren unumgängliche Vorwahl der Modellklasse ist für die neuronale Modellierung notwendig. Meine These ist es jedoch, daß bei der konnektionistischen Modellierung die zweckgerichtete und wissensgestützte Dekontextualisierung im wesentlichen über die Auswahl der Daten, die in das „Training“ einbezogen werden, stattfindet. Dieser Vermutung soll im folgenden Abschnitt nachgegangen werden. Dabei können zwei Auswahlsschritte unterschieden werden. Zum Einen muß vor der Modellierung entschieden werden, welche Prozeßgrößen überhaupt für die Modellierung verwendet werden sollen. Zum Anderen wird anschließend bestimmt, welche der gemessenen Datenpaare zum Training verwendet werden.

Auswahl der Modellgrößen

Die Auswahl der Größen, welche die Ein- und Ausgangsgrößen für das Neuro-Modell bilden sollen, unterliegt zunächst vor allem technischen Beschränkungen. So ist es zwingend notwendig, daß die gewählten Größen auch gemessen werden können, da es sonst nicht möglich ist, Lernbeispiele zu generieren. Außerdem ist es günstig, wenn schon Daten aus der Vergangenheit vorliegen, da die Gewinnung der vielen Datenpaare, die für ein sinnvolles Lernen notwendig sind, sehr zeitraubend sein kann.¹⁷⁸ Damit ist die konnektionistische Modellierung von vornherein auf ein vorinstalliertes technisches Beobachtungsinstrumentarium angewiesen. Eine Modellierung „auf dem Papier“, wie sie bei der analytischen Modellierung durchgeführt werden kann, ist nicht möglich.

Einer der ersten Schritte jeder konnektionistischen Modellierung dynamischer Systeme ist die Festlegung der Ausgangsgrößen des Netzwerkes. Hier müssen die Ziele einfließen, die mit der technischen Verarbeitung des zu modellierenden Prozesses verfolgt werden. Dies ist in der Regel die Senkung der Produktionskosten bei gleichbleibender oder verbesserter Produktqualität. Für die Neuro-Modellierung muß überlegt werden, welche meßbaren Größen die interessierenden Systemeigenschaften kennzeichnen.

Sind die Ausgangsgrößen für das Neuro-Modell ausgewählt, müssen als nächstes die Eingangsgrößen festgelegt werden. Bei einer konnektionistischen Modellierung sind

¹⁷⁸ Allerdings ist es, ähnlich wie bei den Fuzzy-Modellen, ein Vorteil konnektionistischer Systeme, daß die Meßwerte nicht ganz so genau sein müssen und daher billigere Sensoren verwendet werden können (vgl. Zell 1994, S. 27).

in der Regel keine expliziten Beziehungen zwischen den Prozeßgrößen bekannt, was ja gerade der Grund ihrer Anwendung ist. Daher ist die Modellierung bei der Auswahl der relevanten Eingangsgrößen in sehr hohem Maße auf das Wissen von Personen angewiesen, die mit dem Prozeß vertraut sind. Während bei einer analytischen Modellierung die Modelltheorie zumindestens Hinweise darauf gibt, welche Prozeßgrößen für eine erfolgreiche Modellierung eine Rolle spielen, kann eine konnektionistische Modellierung hier fast nur auf Erfahrungswissen zurückgreifen. Daher muß gerade in diesen Schritt viel Arbeit investiert werden. So konstatiert ein Neuro-Modellierer:

„Auch hier beschreibt das neuronale Modell die Realität besser [als das analytische Modell, das vorher verwendet wurde, P.W.]. Allerdings muß bedeutend mehr Aufwand und Wissen hinsichtlich der Wahl geeigneter Eingangsgrößen des Neuronalen Netzes investiert werden [...]“ (Schöllhorn 1997, S. 39)

Die Eingangsgrößenbestimmung ist für den Modellierungserfolg von entscheidender Bedeutung. Wenn nicht die „richtigen“ Größen erfaßt sind, kann das Neuro-Modell den zugrundeliegenden Zusammenhang nicht „Lernen“. Ein solcher Fall wurde z. B. bei dem oben geschilderten „Stahlnetz“ als Ursache für die schlechte Prognose des Schwefelgehaltes vermutet. Die relevante Eingangsinformation – der Schwefelgehalt des Roheisens – war nicht genügend in den „Lernvorgang“ eingegangen. Wie in 3.6.3.3 beschrieben wurde, weist ein Neuro-Modell, das nicht mit den relevanten Daten „trainiert“ wurde, eine schlechte Generalisierungsfähigkeit auf. Selbst wenn beim „Lernen“ ein geringer Fehler erreicht wurde, kann es im Betrieb versagen, sobald ein neuer Fall auftritt. Wenn dagegen zuviele Eingangsgrößen aufgenommen werden, die zudem untereinander Abhängigkeiten aufweisen, können die auftretenden redundanten Informationen dazu führen, daß das „Lernen“ in Sackgassen führt.

Sind die Eingangsgrößen ausgewählt, muß noch entschieden werden, in welcher Weise die ausgewählten Größen in das Training eingehen sollen. So kann es etwa sein, daß der zeitliche Verlauf einer Größe von Bedeutung ist, so daß Meßwerte aus verschiedenen Zeitpunkten einbezogen werden müssen. Dies war z. B. bei den dynamischen Eingangsgrößen des oben geschilderten Stahlofen Modells der Fall. Andere Größen dagegen werden ausreichend durch einen einmaligen Wert während des gesamten Prozeßverlaufes charakterisiert. Sollen zeitliche Entwicklungen erfaßt werden, so ist die Bestimmung des relevanten Zeitraumes von elementarer Bedeutung. Solche Entscheidungen können sinnvoll nur auf der Basis eines Verständnisses der Prozeßdynamik getroffen werden.

Von den Modellgrößen zu Trainingsdatenpaaren

Mit der Auswahl der Ein- und Ausgangsgrößen des Neuro-Modells ist ein wesentlicher Schritt der Dekontextualisierung vollzogen. Es steht nun fest, wie der Blick strukturiert ist, der auf den Prozeß geworfen wird. Bis zu dem fertigen Satz von Daten, an denen das Neuro-Modell „lernen“ kann, die ausgewählten Aspekte des Vorgangs nachzubilden, ist es jedoch noch ein weiter Weg. Zunächst muß bestimmt werden, in welchen Zuständen des Prozesses Meßwerte benötigt werden und wieviele Messungen durchgeführt werden sollen. Ebenso wie von der Auswahl der Eingangsgrößen, hängt es auch von der Anzahl und Lage der Lerndatenpaare entscheidend ab, wie das Neuro-Modell generalisieren kann und damit, wie es sich in der Anwendungsphase verhält. Eine möglichst vollständige Erfassung der relevanten Prozeßzustände in dem Trainingsdatensatz ist daher sehr wichtig für die Betriebssicherheit des

Systems. Besteht z. B. eine Abhängigkeit der Prozeßdynamik von der Jahreszeit, etwa weil diese die Qualität des Rohmaterials beeinflußt, müssen im Training Daten aus allen Jahreszeiten verwendet werden. Ansonsten wird das Modell versagen, sobald eine neue Jahreszeit anbricht. Welche Zustände jedoch in dieser Weise „relevant“ sind, kann auch hier wegen des fehlenden analytischen Wissens nur aus der Erfahrung im Umgang mit dem technischen System bestimmt werden. Damit beruhen sämtliche Dekontextualisierungen, die bisher beschrieben wurden, in hohem Maße auf Erfahrungswissen mit dem konkreten zu formalisierenden Weltausschnitt. Nur eine ständige Rückversicherung an solchem lokalen Wissen kann eine zuverlässige Neuro-Modellierung ermöglichen. So warnt etwa Torkil Deigaard (1995), ein Projektmanager, der Neuro-Modelle für die Optimierung eines Zementmahlwerkes eingesetzt hat: „*When a network is trained, checking with an experienced operator is recommendable. The main correlations will be known to the operator and the network must conform to these.*“ (S. 971)

Letzte Bereinigungen: Datenvorverarbeitung

Ein letzter Schritt vor Beginn des Trainings ist die Vorverarbeitung der Trainingsdaten.¹⁷⁹ In den meisten Fällen kann ein konnektionistisches System nicht einfach mit den rohen Daten, die von dem Meßinstrumentarium geliefert werden, trainiert werden. Zunächst ist schon bei der Messung selbst eine sorgfältige Filterung der Daten vonnöten. Nicht jede beliebige verrauschte Äußerung der Welt kann als Trainingsmuster verwendet werden. Auch die bereinigten Meßdaten werden oft noch weiter bearbeitet. Häufig werden z. B. für einige Größen charakteristische Kennwerte eingeführt. In anderen Fällen werden mehrere Größen zu einer einzigen Eingangsgröße zusammengefaßt. Meistens werden alle Größen auf einen bestimmten Wertebereich normiert. Möglich sind auch gezielte mathematische Transformationen der Meßwerte. Diese Verfahren der Datenvorverarbeitung (Preprocessing) gelten als eine wichtige Möglichkeit, vorhandenes Wissen, das wegen des Black-Box Charakters der Modellierung nicht direkt eingebracht werden kann, dennoch auszunutzen. Interessant ist, daß hier auch häufig versucht wird, rudimentär vorhandene naturwissenschaftliche Beschreibungen einzubringen.¹⁸⁰

Die Verarbeitung der Trainingsdaten ist schon eine Umordnung, die sich weitestgehend innerhalb formaler Strukturen bewegt. In ihr werden die Spuren weltlicher Unregelmäßigkeiten geglättet. Entsprechend spielt hier Expertenwissen über allgemeine Verfahren zur Datenverarbeitung wie etwa Statistik und Meßsignalverarbeitung eine

179 Auf die große Bedeutung der Datenvorverarbeitung (Preprocessing) für jede Form der Kontrolle von Prozessen über Methoden der Informationsverarbeitung hat vor allem Beniger (1986) hingewiesen. Beniger interpretiert die Rationalisierung moderner Gesellschaften als eine Datenvorverarbeitung, die dazu dient, die Menge der weiter zu verarbeitenden Informationen zu reduzieren (S. 15 f.). Je mehr Aufwand für die erste Zurichtung der formalisierten Welt betrieben wird, desto geringer ist, nach Beniger, der Aufwand für die anschließende Datenverarbeitung. Die konnektionistische Modellierung liefert in einem kleinen Umfang eine Illustration von Benigers These.

180 Ein Beispiel für einen solchen Versuch findet sich bei Schöllhorn (1997). Hier werden bei der konnektionistischen Modellierung eines chemischen Prozesses (Blending-Prozeß in einer Raffinerie) die Prognosen aus einem klassischen thermodynamischen Modell von Gemischen in die Eingangsgrößen des Netzwerkes eingearbeitet. Das analytische Modell wurde der Komplexität der realen Produktionsprozesse zwar nicht gerecht, so daß die Erstellung des Neuro-Modells angestrebt wurde, die enthaltene Information sollte jedoch in das Black-Box Modell herübergerettet werden.

größere Rolle als bei den vorangegangenen Dekontextualisierungsschritten, aus denen die behandelten Datensätze hervorgegangen sind.

Fazit zur Dekontextualisierung

In allen geschilderten Maßnahmen zur Generierung der Lerndaten werden Grenzen gezogen, um aus einer komplexen, kontinuierlichen Umgebung denjenigen Ausschnitt herauszutrennen, der für die Weiterverarbeitung interessiert. Dabei wird menschliches Wissen in verschiedener Weise eingesetzt, um ein Funktionieren der Formalisierung zu erreichen. Was ist nun gerade für die neuronale Form der Wissensvorverarbeitung gegenüber anderen Vorgehensweisen charakteristisch?

Im Gegensatz zur analytischen Modellierung ist die Auswahl der eingehenden Größen nicht durch das vorhandene theoretische Wissen beschränkt. Daher können auch Prozeßeigenschaften in die Modellierung eingehen, für die ein physikalischer Zusammenhang mit den Ausgangsgrößen völlig unbekannt ist (z. B. die Geräusche im Abzug des Stahlofens). Der Prozeß kann so genommen werden, wie er sich dem beobachtenden Menschen präsentiert, ohne die Einschränkung des Blicks durch die naturwissenschaftlich-analytische Methode. Es kann auch solches Wissen eingebracht werden, das keine naturwissenschaftliche Grundlage nachweisen kann. Das Fehlen analytischen Wissens bewirkt eine stärkere Angewiesenheit auf Erfahrung und Beobachtung, auch wenn über den Umweg der Datenvorverarbeitung und bei der Entscheidung über einzubringende Eingangsgrößen durchaus naturwissenschaftlich begründetes Wissen eingeht. Andererseits spielt die technische Erfäßbarkeit der eingehenden Größen hier, wie auch bei der Fuzzy-Modellierung, von vornherein eine größere Rolle als bei der analytischen Modellierung, die zunächst auch mit abstrakten Größen arbeiten kann.

Ein Charakteristikum neuronaler Modellierung kann auch im Hinblick auf die Bewegung zwischen Welt und Labor ausgemacht werden. Zu der Gewinnung der Lerndaten für Neuro-Modelle muß als erstes der tatsächliche konkrete Prozeß aufgesucht und „befragt“ (vermessen) werden. Damit kann der erste Modellierungsschritt eher als ein Transport des *Labors in die Welt* als ein Transport von *Welt in das Labor* beschrieben werden. Neuro-Modelle können nicht durch Versuche an speziell für das Labor gefertigten Objekten gewonnen werden. Die konnektionistische Modellierung dynamischer Systeme ist immer auf „echte“ Daten der realen Vorgänge angewiesen. Die „Befragung“ geschieht jedoch nicht unstrukturiert, sondern unter Voraussetzungen, die im Hinblick auf den Zweck der Modellierung geschaffen wurden. Für die konnektionistische Modellierung gilt damit in gleichem Maße wie für die anderen Verfahren technisch motivierter Beschreibung von Welt, daß die Auswahl der überhaupt erfaßten Aspekte des betreffenden Weltausschnittes durch den Zweck der Modellierung bestimmt ist. Die Gestaltung des die Beobachtung strukturierenden Rahmens wird jedoch zu dem entscheidenden Übersetzungsschritt konnektionistischer Modellierung. Von ihm hängt wesentlich ab, welche Sicht auf den modellierten Ausschnitt von Welt durch das Neuro-Modell repräsentiert wird.

Beispiel: Netzauftrieb mit Hindernissen

Zum Abschluß dieser Beschreibung der Datenauswahl und Bearbeitung als zweckgerichteter Dekontextualisierung sollen die Überlegungen durch ein Beispiel veranschaulicht werden. Dieses ist aus der von Eberhard Schöneburg herausgegebenen

Sammlung industrieller Anwendungen konnektionistischer Systeme entnommen.¹⁸¹ Alle Seitenangaben des folgenden Abschnitts beziehen sich auf diese Veröffentlichung.

Gegenstand der Untersuchung ist das „Auftriebsphänomen“ an der Nordwestafrikanischen Küste. Da dieses Phänomen dazu führt, daß sich in bestimmten Regionen wärmere Wasserschichten bilden und diese größere Fischschwärme anziehen, bestand ein Interesse an seiner Vorhersage. Die Autoren geben folgende Begründung für den Einsatz konnektionistischer Systeme:

„Der Einsatz Neuronaler Netze für diese Untersuchung wurde gewählt, da momentan kein mathematisches Modell existiert, mit dem konkrete Aussagen gemacht werden können über alle Einflußfaktoren, die mit dem rückgekoppelten Meeressystem im allgemeinen und dem Auftriebsphänomen im besonderen in Verbindung stehen“ (S. 284)

Das konnektionistische System sollte lernen, aus Messungen der Windverhältnisse die Oberflächentemperatur des Meeres vorherzusagen. Als Lernmaterial lagen Satelliten-daten über die Meerestemperatur und Messungen der Windverhältnisse aus acht Jahren vor, die zum Zweck der Wettervorhersage an festen und beweglichen Meßstellen im Meer bestimmt worden waren. Aus rein mathematischer/neuroinformatischer Sicht handelt es sich um eine rein formale Aufgabenstellung:

„Das Problem, eine Korrelation zwischen den beiden Datensätzen zu finden, kann auf ein Mustererkennungsproblem übertragen werden.“ (S. 286)

Im Verlauf der tatsächlichen Implementierung ergaben sich jedoch zahlreiche praktische Schwierigkeiten im Zusammenhang mit den Datensätzen:

„Wir mußten während des Projektes feststellen, daß relativ komplizierte Input- und Output-Kodierungen für die Verbesserung der Resultate wichtig waren“ (S. 288)

So hatte es offensichtlich im Lauf der Zeit verschiedene Meßverfahren für die Winddaten gegeben, so daß diese uneinheitlich waren:

„Solche inhomogenen Daten können nicht ohne Vorkehrungen für das Training eines Neuronalen Netzwerkes benutzt werden. Die Winddaten mußten zuvor in ein einheitliches Format transformiert werden. Wir lösten dieses Problem, indem wir das gröbere Gitter der älteren Daten mittels mathematischer Transformationen in die kleinere Auflösung ‘übersetzten’.“ (S. 289)

Das nächste Problem bildeten die Satellitenaufnahmen. Aufgrund der verschiedenen Wetterlagen waren diese „unvollständig und lückenhaft“ (S. 290). Die Lösung:

„Die fehlenden Daten wurden wie folgt kompensiert: Die Temperatur nimmt bekanntermaßen zu, je weiter man sich von der Küste entfernt, da das Auftriebsphänomen in küstennahen Regionen am stärksten ist. [...]. Anstatt für eine Mittelwertbildung die sst-werte [sea surface temperature P.W.] zu addieren, berechneten wir das gewichtete Mittel aus den Differenzen zwischen dem sst-Wert und seinem Durchschnitt, um dadurch eine Niveaue Anpassung an die beim entsprechenden Längengrad zu erwartende Temperatur zu erreichen.“ (S. 290)

Alle Daten wurden außerdem einer normalisierenden Transformation unterzogen. Die ersten Versuche einer Modellierung des Zusammenhangs brachten bei einer Genauig-

¹⁸¹ Schöneburg/Straub u. a. (1995).

keit von 1°C eine Trefferquote von 49.00%. Um diese Quote zu verbessern, wurden die Ein- und Ausgangsdaten weiter bearbeitet. Zunächst wurde die Methode der Durchschnittsbildung bei den Winddaten verändert, um mögliche regionale Abhängigkeiten zu berücksichtigen. Dies ergab eine leichte Verbesserung. Dann wurden nur Daten aus dem Frühjahr verwendet, da eine Saisonabhängigkeit des Auftriebsphänomens vermutet wurde. Dieser Schritt brachte eine Verbesserung auf 61%. Als nächstes wurde die statistische Vorverarbeitung der Eingangsdaten verbessert, was schließlich zu dem besten Ergebnis von allen führte (69,52%). Weitere Versuche, z. B. die Daten der drei untersuchten Breitengrade anders zu vermischen, brachten keine Verbesserungen. Daraus wurde geschlossen, daß die Abhängigkeiten von Breitengrad zu Breitengrad stark variieren.

Das geschilderte Beispiel zeigt sehr deutlich, wie stark wissenschaftlich gestützte Bearbeitungen der Datenbasis den Erfolg einer konnektionistischen Modellierung beeinflussen. Sowohl die Auswahl der Ein- und Ausgangsgrößen als auch die Vorverarbeitung der gewonnenen Daten stützt sich in hohem Maße auf qualitative Annahmen über die Natur des untersuchten Phänomens.

3.6.4.2 Weitere Umordnungen im Netz und darüber hinaus

Festlegung der Netztopologie: Strukturidentifikation

Durch die Wahl der Ein- und Ausgangsgrößen des konnektionistischen Modells ist ein Teil der Modellstruktur festgelegt.¹⁸² So bestimmt die Anzahl der Ein- und Ausgangsgrößen des Modells auch die Anzahl der Ein- und Ausgangsneuronen des Netzwerkes.¹⁸³ Wie jedoch die inneren Schichten aussehen, ist zunächst völlig offen. Sowohl die Anzahl der verdeckten Schichten als auch die Anzahl der Einheiten pro Schicht kann beliebig variiert werden. Für die Bestimmung der Netztopologie gibt es keine gängige Vorgehensweise und auch kaum Anhaltspunkte für angemessene Auswahlkriterien. Der theoretische Beweis, daß konnektionistische Systeme universelle Approximatoren sind und damit jeden Funktionsverlauf nachbilden können, ist lediglich ein Existenzbeweis und gibt keinerlei Hinweis darauf, mit welcher konkreten Netzstruktur der jeweilige Zusammenhang erfaßt werden kann. Viele Autoren gründen daher die Auswahl ihrer Netzarchitektur auf Ausprobieren. So wurden etwa für die oben beschriebene Auftriebsmodellierung pro Testreihe jeweils 30 verschiedene Netzwerkstrukturen getestet. Aus diesen wurde dann dasjenige, mit der besten Vorhersagegenauigkeit, ausgewählt. Für das weiter oben beschriebene Stahlofen-Netz wird berichtet:

„It (the network P.W.) has one hidden layer implemented consisting of 15 neurons. Learning success on nets with two hidden layers and more neurons for internal representation was worse“ (Keuthen u. a. 1995, S. 308)

Ähnlich bei der Zementwerk Modellierung:

„The tests were carried out with 2, 4 and 6 neurons in the hidden layer, for each signal we wanted to predict. Two and four neuron networks quickly achieved a good per-

¹⁸² Im folgenden wird von der Standardkonfiguration – Multilayer-Perceptron mit Backpropagation Lernverfahren – ausgegangen.

¹⁸³ Vgl. Abschnitt 3.6.2. Allerdings kann entweder für jede Ausgangsgröße ein eigenes Netzwerk oder aber ein einziges Netzwerk mit allen Ausgangsgrößen gebildet werden. Hier geben meist praktische Erwägungen den Ausschlag.

*formance, but seemed to lack capacity as the number of samples increased. The 6 neuron network, until now, has shown constant performance, **leading to the conclusion, that this capacity fits the application.***“ (Deigaard 1995, S. 972, Hervorhebung P.W.)

In der letzten Äußerung klingt die Vermutung an, daß derjenigen Netzstruktur, die den geringsten Fehler liefert, eine Struktur innerhalb des Prozesses entspricht. So läßt sich das Zementwerk eben nicht mit vier, sondern nur mit sechs Neuronen modellieren. In einer anderen Äußerung deutet der gleiche Autor an, daß eine reibungslose Funktion nur bei einer echten Korrespondenz zwischen der Netzstruktur und den physikalischen Zusammenhängen innerhalb des modellierten Systems gewährleistet sei:

*„Having a good fit on the learning set says nothing about the prediction capabilities, it only tells that we have enough (but maybe to many) neurons to describe the correlations in the learning set. Only when **the right physical correlations have been found**, the prediction performance will be satisfying“* (S. 973 Hervorhebung P.W.)

Ob die „richtigen physikalischen Zusammenhänge“ gefunden worden sind, kann nicht an dem Trainingsergebnis, sondern nur an der praktischen Bewährung des Modells abgelesen werden. Ob tatsächlich Maßstäbe für eine derartige Korrespondenz angegeben werden können, kann hier nicht beurteilt werden. Zumindestens aber wäre die Voraussetzung für ihr Gelingen, daß die gewählten Eingangsgrößen des Netzwerkes überhaupt den relevanten physikalischen Größen entsprechen – was, wie bereits gezeigt wurde, keineswegs selbstverständlich ist. Selbst wenn es jedoch gelungen ist, die Wirkungsprinzipien des modellierten Systems in dem elektronischen Netzwerk zu erfassen, bleiben diese dem menschlichen Verständnis verborgen, da die Modellstruktur nicht in bedeutungsvollen Begriffen interpretiert werden kann. Die „neuronale“ Strukturidentifikation bleibt eine rein formale.

Damit zeigt sich auch in diesem Modellierungsschritt eine deutliche Verschiebung gegenüber der klassischen mathematisch-physikalischen Formalisierung von Welt. Bei einem analytischen Modell ist die Modellstruktur wesentlich für die Funktion des Modells. Sie leitet sich aus den Wirkungsprinzipien her, von denen angenommen wird, daß sie die Ein- und Ausgangsgrößen des Modells verbinden, und repräsentiert damit die Kategorien menschlicher Analyse der Vorgänge in der Welt. Bei einem Neuro-Modell dagegen ist die Modellstruktur von untergeordneter Bedeutung und wird durch heuristische Verfahren bestimmt. Im Gegensatz zur linguistisch orientierten Fuzzy-Modellierung und auch zu naturwissenschaftlich gestützten Ansätzen kann Wissen über regelhafte Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsdaten nicht in die Modellierung eingehen.¹⁸⁴ Die wesentliche Eingriffsmöglichkeit besteht, wie oben beschrieben wurde, bei der Auswahl und Zurichtung der Modellgrößen. Die Bestimmung der Struktur des Netz-Modells ist somit zwar ein Teil des Rekonfigurationsvorgangs, der von der konkreten Welt bis zum funktionierenden Modell-Instrument führt. Sie ist aber im wesentlichen schon eine Umordnung innerhalb eines formalen Konstruktes.

¹⁸⁴ Für Klassifizierungsanwendungen kann Wissen in Form von Beispielen d.h. richtigen Klassifizierungen eingebracht werden. Das gibt es bei Prozeßmodellierung in dieser Form nicht.

Lernen: Parameteridentifikation

Lernen bedeutet für ein konnektionistisches System, wie es in Abschnitt 3.6.2 beschrieben wurde, die Festlegung der Gewichte zwischen den Verbindungen der Prozeßeinheiten nach einem vorgegebenen Algorithmus. Wie im vorigen Abschnitt deutlich wurde, können die Festlegung der Netztopologie und das Lernen der Parameter nicht als chronologisch streng getrennte Modellierungsschritte verstanden werden, da im Verlauf der Modellierung die Netzarchitektur immer wieder abgeändert wird und die Gewichte neu bestimmt werden müssen. Wurde die Festlegung der Netzarchitektur als Strukturidentifikation des Modells interpretiert, so kann die im Lernvorgang vollzogene Gewichtsbestimmung als Parameteridentifikation verstanden werden. Der Begriff der Modellparameter bekommt damit bei der konnektionistischen Modellierung, ähnlich wie die Modellstruktur, eine andere Bedeutung als im klassischen analytischen Verständnis von Modellierung. Wie es für die „Methode der Finiten Elemente“ in dem Abschnitt „Modellparameter – Kennwerte der Realität“ auf Seite 61 beschrieben wurde, charakterisieren die Modellparameter in einem analytischen Modell konkrete Eigenschaften der behandelten Dinge wie etwa Abmessungen, Gewicht, Wärmeleitfähigkeit oder Strömungswiderstand. Sie müssen durch Messungen am tatsächlichen Objekt für jeden Fall neu bestimmt werden. Hier geht bei der klassischen Modellierung eine Fülle von eigenständigem, praktischem Wissen um die Dinge ein. Bei einem konnektionistischen Modell dagegen haben die Modellparameter, in Gestalt der Gewichtungen der Verbindungen zwischen den Neuronen, keinerlei Bezug zu irgendwelchen Eigenschaften der modellierten Dinge, wie sie sich der menschlichen Beobachtung darstellen.

3.6.4.3 Letzte Umordnungen vor dem Netz-Einsatz

In den meisten Fällen wird eine konnektionistische Modellierung nicht zu reinen Forschungszwecken, sondern mit einem konkreten Anwendungshintergrund durchgeführt. Das fertig trainierte Neuro-Modell wird dazu benutzt, einen technischen Prozeß, der bisher auf der Basis von Erfahrungswerten oder mit ungenügenden analytischen Modellen durchgeführt wurde, auf eine neue Weise in den Griff zu bekommen. Dafür muß das Neuro-Modell in ein Konzept der Prozeßführung eingebunden werden. Bei dieser letzten Rekonfiguration vor der Inbetriebnahme der Neuro-Technologie wird das Modell selbst nicht mehr verändert. Stattdessen wird auf der Basis des Modells der gesamte Prozeß neu geordnet. Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten, von denen die wichtigsten hier kurz vorgestellt werden sollen.

Netzbasierte Optimierung

Bei einer Optimierung wird der Prozeß an dem fertig trainierten Neuro-Modell unter verschiedenen Bedingungen durchgespielt. Auf der Basis der Ergebnisse dieser Simulationen wird dann entschieden, unter welchen Bedingungen der reale Prozeß durchgeführt werden soll. So könnte beispielsweise das Stahlkochen mit verschiedenen Anfangstemperaturen neuro-simuliert werden. Diejenige Temperatur, bei der sich in der Simulation die günstigste Zusammensetzung und Temperatur der Schlacke am Ende des Prozesses ergibt, wird dann für den echten Prozeß genommen. Der Vorgang des „Durchspielens“ kann selbst wieder algorithmisiert und damit automatisiert werden. In einem solchen Optimierungsvorgang werden dann sämtliche Parameter solange hin- und hergestellt bis eine „optimale“ Prozeßführungsstrategie gefunden ist.

Dies wurde z. B. für das schon erwähnte Zementmahlwerk mit folgendem Ergebnis durchgeführt:

„A surprisingly complex correlation between the input variables and the economy was found by the network. Earlier it had been good practice to run the mill at the highest possible production, with a high gas flow, but the network often finds superior and much more relaxed operating situations. The existence of these operations was known to the operators. Saying when and how to go for the relaxed operating was found difficult.“ (Deigaard 1995, S. 974)

Eine Optimierung geschieht stets auf zuvor festgelegte Kriterien hin. Eine Vorwahl möglicher Optimierungsgrößen wurde schon durch die Auswahl der Ausgangsgrößen des Neuro-Modells getroffen. Prozeßgrößen, die hier nicht auftauchen, können auch nicht optimiert werden. Über das Fehlerkriterium kann aber weiter Einfluß genommen werden. So wird für das Zementwerk vorgeschlagen:

„When optimizing economy, the error criteria should include some kind of mortgage cost of the plant investment to avoid finding an optimum with very low production“ (ebd.)

oder:

„If the plant is low in rawmeal stock, the production level should be rated higher than pure grinding economy. Also the operator should be given influence on the optimization criterions enabling him to fill the silo, if a few days stop for maintenance on the mill is required in the near future.“ (ebd.)

Hier fließen also vor allem betriebswirtschaftliche Gesichtspunkte in den Optimierungsalgorithmus ein. Aber auch äußere Rahmenbedingungen wie z. B. Anforderungen an die Zusammensetzung der Abgase oder Lärmbegrenzungen müssen hier auftauchen, wenn sie Eingang in die Prozeßführung finden sollen. In dieser Hinsicht besteht kein wesentlicher Unterschied zwischen klassischen Optimierungsstrategien und konnektionistisch basierter Optimierung. In beiden Fällen optimieren programmierte Algorithmen von außen vorgegebene Kriterien. Differenzen ergeben sich jedoch bezüglich des Gültigkeitsbereichs und der Interpretierbarkeit der Ergebnisse. Diese werden in Abschnitt 3.6.6 im Zusammenhang mit der Ausweitung des konnektionistischen Labors diskutiert werden.

Netzbasierte Regelung

Das Ziel eines Regelungskonzeptes für einen Prozeß oder eine Anlage ist es, einen geschlossenen Regelungskreis herzustellen. Das bedeutet, daß aus laufend durchgeführten Messungen des Prozeßzustandes und einer Vorgabe von Sollgrößen automatisch bestimmt wird, wie die Eingangsgrößen verstellt werden sollen.

Wenn diese Berechnung auf der Basis von Modellen des Prozesses geschieht, spricht man von einer modellbasierten Regelung.¹⁸⁵ Die moderne Regelungstechnik¹⁸⁶ liefert extrem komplexe, ausgefeilte Vorgehensweisen für modellbasierte Regelungen. So ist es z. B. möglich, die von dem Prozeßmodell vorhergesagten Werte ständig mit

¹⁸⁵ Das gängige Verfahren ist demgegenüber die Einstellung von Standardreglern auf der Basis empirischer „Einstellungsregeln“. Für solche Methoden wird kein Modell gebraucht. Es genügen bestimmte charakteristische Eigenschaften des Systems, die aus dessen Reaktion auf spezifische Veränderung der Eingangsgröße gewonnen werden.

denen des echten Prozesses zu vergleichen und das Modell daraufhin anzupassen. Ein komplizierter Algorithmus berechnet dann immer aus dem neuesten Modell die optimalen Einstellungswerte. Diese Verfahren beruhen in der Regel auf analytischen Modellen oder auf Modellen, die aus einer Systemidentifikation mit Parameterschätzung ermittelt wurden. Für nichtlineare Systeme sind sie nur unter Einschränkungen einsetzbar, so daß meistens Linearisierungen vorgenommen werden. In neuerer Zeit gibt es Ansätze, modellbasierte Regelungskonzepte auch auf der Basis von Neuro-Modellen zu entwickeln. Ein großer Vorteil dieser Methode gegenüber anderen Formalisierungsverfahren ist es, daß Neuro-Modelle problemlos auch nichtlineare Zusammenhänge abbilden können.

Neben solchen neuro-modellbasierten Regelungsverfahren, gibt es noch andere Regelungskonzepte, die auf konnektionistischen Systemen beruhen, ohne daß diese als Prozeßmodelle dienen. So ist es z. B. denkbar, direkt den „Bediener“ einer Anlage zu modellieren. Dazu die Regelungstechniker Neumerkel und Lohnert (1994):

„Ein fundamentaler Ansatz ist das Kopieren eines existierenden Reglers, z. B. eines erfahrenen Bedieners, wobei sich zunächst keine Verbesserung der Regelung ergibt. Die formale Repräsentation der Reglereigenschaften in einem Neuronalen Netz kann aber andere Vorteile bieten wie z. B. Langzeitkonstanz und beliebige Verfügbarkeit.“

Hier wird die Erfahrung des Bedieners direkt abgeschöpft, indem seine Handlungen vermessen werden. Welche Probleme die hier oft zugrundeliegende Gleichsetzung von beobachteter Handlung mit Wissen mit sich bringt, wurde schon in dem Kapitel zu der Fuzzy-Regelung, wo eine ähnliche Vorgehensweise üblich ist, diskutiert.¹⁸⁷

Neumerkel und Lohnert (1994) betonen in ihrem Überblicksaufsatz über industrielle Anwendungen neuronaler Regelungen, daß zwar eine Vielzahl konnektionistischer Prozeßmodellierungen auf der Basis realer Daten und darauf aufbauende Optimierungsansätze vorliegen, eine nennenswerte Zahl von implementierten neuronalen Reglern jedoch nicht existiert. Sie rechnen aber für die Zukunft mit einer raschen Verbreitung dieser „vielversprechenden“ Ansätze.

3.6.5 Wessen Wissen?

In den vorangegangenen Ausführungen wurde herausgearbeitet, daß es gezielt eingebrachtes menschliches Wissen ist, das konnektionistische Modellierung zum Funktionieren bringt. Dabei zeigten sich – gegenüber klassischer analytischer Modellierung – Verschiebungen in der Art und den Angriffspunkten des eingebrachten Wissens. Statt bei der Bestimmung der objektbezogenen Modellparameter oder der Herleitung der Modellstruktur fließt das Wissen um die Welt bei der konnektionistischen Modellierung hauptsächlich in die Auswahl und Bearbeitung der Trainingsdaten ein. Diese Veränderungen in dem Vorgang der Generierung und Anwendung technischen Wissens sind jedoch keineswegs nur rein formale Umordnungen. Sie haben vielmehr sehr wohl auch Folgen für die Akteure, die an der Wissensverarbeitung beteiligt sind. Im Sinne eines soziologischen Wissensbegriffes, wie er für diese Arbeit in Abschnitt

¹⁸⁶ Die Bezeichnung „moderne Regelungstechnik“ wird nicht primär im zeitlichen Sinne verwendet. Man faßt darunter Ansätze zur optimalen Steuerung und Regelung im Zeitbereich, die nur unter Einsatz leistungsfähiger Prozeßrechner angewendet werden können. Solche Ansätze gewannen seit Mitte der 1950er Jahre an Bedeutung, ohne daß die „klassischen“ Ansätze dadurch ersetzt worden wären (vgl. Unbehauen 1992, S. 22).

¹⁸⁷ Vgl. Abschnitt 3.5.7.

1.4.2 eingeführt wurde, kann daher von einer Veränderung der in die technische Verarbeitung von Welt eingehenden Wissensformen gesprochen werden. In diesem Abschnitt soll konkreter ausgeführt werden, welche Verteilungen von Kompetenzen zwischen menschlichen Akteuren für die konnektionistische Modellierung charakteristisch sind.

In der Literatur taucht häufig die Vorstellung auf, mit konnektionistischer Modellierung sei der erste Schritt in Richtung einer automatisierten Formalisierung beliebig komplexer Vorgänge möglich. Eine solche Einschätzung wird beispielsweise von zwei Protagonisten der Neuroinformatik Softwarebranche folgendermaßen formuliert:

„Long range thinking leads us to systems which are almost void of any user information and still are able to model and optimize systems. This goal will be very likely achieved in 2 to 3 years. Our vision is a „cybernetic system“ which fully automatically identifies and optimizes plants without any detailed instructions given by the user. Dately we have come very close to reaching a solution.“ (Froese/ Vollmer 1995, S. 1011)

Die Vision der beiden Autoren von der Atlan-tec KG ist bestechend. Eine automatische Modellierung soll in naher Zukunft die fehleranfälligen menschlichen Bemühungen um eine adäquate Formalisierung von Weltausschnitten ersetzen. Die Atlan-tec KG bietet zu diesem Zweck eine Software an, die den Prozeßingenieur bei der neuronalen Modellierung unterstützt. Spezielle Filter leisten die Auswahl der Trainingsdaten nach den automatisch durchgeführten Messungen, und ein Expertensystem leitet die weitere Vorgehensweise an. Nach ihrer Vorstellung nämlich, sind es die Fehler der Benutzer, die das Funktionieren konnektionistischer Modelle verhindern:

„Many projects in the past have failed despite the advantages of ANN [Artificial Neural Networks P.W.], the quantity of tools offered and the progress made in the held of neuroinformatics giving these attempts a closer look one discovers the following reoccurring mistakes made by the user: [...]“ (ebd. S. 1011)

In dieser Arbeit nun wird, wie weiter vorne ausführlich diskutiert worden ist, die entgegengesetzte These vertreten. Gerade die Anwenderinnen und Anwender von Modellierungstechniken mit ihrem Wissen um lokale Bedingungen der zu behandelnden Weltausschnitte sind es nach meiner Einschätzung, die eine technische motivierte Modellierung zum Funktionieren bringen. Menschliches Wissen und Erfahrung führen demnach gerade zu einer erfolgreichen Behandlung von Welt hin, statt als bloßer empirischer „Behelf“ von ihrer „korrekten“ Analyse wegzuleiten. Eine saubere Trennung zwischen „Fachwissen“ und „Modellierungswissen“ wie sie von Froese und Vollmer angestrebt wird, ist nach dieser These nie wirklich durchführbar. Vielmehr vermischt sich beides im Vorgang der Modellierung zusammen mit anderen Komponenten menschlicher Wissensanwendung. Dies ist, wie zuvor gezeigt wurde, auch für die scheinbar voraussetzungslose konnektionistische Modellierung der Fall. Ebenso wenig wie naturwissenschaftliche Fundamentaltheorie von sich aus Hinweise darauf gibt, in welcher Weise sie auf Vorgänge der wirklichen Welt bezogen werden soll, kann aus einem konnektionistischen Ansatz etwas darüber abgeleitet werden, wie die „richtige“ Auswahl der Eingangsdaten vorgenommen werden kann. Einiges an Arbeit und Wissen muß „am Ort“ aufgewandt werden, um Netze zu knüpfen, die Teile der Welt repräsentieren sollen. In Veröffentlichungen zu Anwendungen konnektionisti-

scher Modellierung, die aus dem jeweiligen Fachkontext und nicht so sehr aus dem Bereich der Neuroinformatik stammen, stößt man schnell auf Hinweise, die diese These unterstützen. Als programmatisch kann beispielsweise folgender Titel eines Anwendungsaufsatzes betrachtet werden: „*It takes knowledge to apply neural networks for control*“ (Beaverstock 1993). In die gleiche Richtung weist der folgende Bericht über eine industrielle Anwendung konnektionistischer Modellierung¹⁸⁸, in dem die beiden Autoren eine Analyse des Scheiterns vieler konnektionistischer Modellierungen liefern, die der oben zitierten von Froese und Vollmer in mancher Hinsicht entgegensteht:

„Many Neural-Network applications have failed in the past because a problem was explained and some data were solely given to the neural-network expert, who then worked unattended for the rest of the project. This easily can lead to neural networks that minimise all kinds of criteria, have good scores on (artificial) test sets but are simply not fit for their purpose. Therefore it is absolutely crucial that there is frequent communication between the neural-network and the problem area expert. This cooperation will encourage the generation of more data, will lead to better ideas about what criteria the neural network should optimize and will make it much easier to incorporate knowledge about the problem. [...] The knowledge can be incorporated by e.g. constructing a good training and testing set, selection and inclusion of relevant input parameters, and appropriate preprocessing.“ (Cardon/Hoogstraten 1995, S. 236)

Solche Aussagen geben deutliche Hinweise darauf, daß sich das notwendige problem-spezifische Wissen nicht automatisch generieren läßt. Dennoch kann davon ausgegangen werden, daß sich die oben konstatierten Verschiebungen auch in einer veränderten Zusammensetzung der an der Modellierung beteiligten Personengruppen niederschlagen. So liegt es auf der Hand, daß der Experte der klassischen Modellierung, der einen großen Fundus an naturwissenschaftlichem Grundwissen hat, und dieses in Zusammenarbeit mit den Spezialistinnen auf den jeweiligen Prozeß anwendet, der andererseits aber auch um die Anforderungen des Modellierungsverfahrens einschließlich der Computerprogrammierung weiß, für die konnektionistische Modellierung nicht mehr gebraucht wird. Gerade diese Sorte von hochqualifizierten Modellierern ist es nun, deren Fehlen für die klassische Modellierung immer wieder beklagt wird und deren Einsatz hohe Kosten verursacht. Dies ist sicherlich ein Grund dafür, daß konnektionistische Modellierung gerade bei besonders komplexen Modellierungsaufgaben häufig vorgezogen wird. Stellvertretend für viele hier eine Stimme aus der chemischen Industrie:

„One of the chief barriers to the more widespread use of advanced modelling and control techniques in the chemical/petroleum industry is the cost of model development and validation. Often modelling costs account for over 75 percent of the expenditures in an advanced control project. Since neural nets can learn by example, they may offer a cost effective method of developing useful process models“ (Bhat u. a. 1990, S. 24).¹⁸⁹

¹⁸⁸ Es ging hier um die Analyse der Bodenstruktur in Erdölfeldern der Shell Internationale Petroleum. Das konnektionistische System sollte die in Probebohrungen gewonnenen Meßwerte (wireline-logs) verschiedenen Gesteinsklassen zuordnen.

Da das „Lernen aus Beispielen“ teures Expertenwissen spart, können durch den Einsatz von Neuro-Modellen die Modellierungskosten gesenkt werden. Damit zeigt es sich, daß es schon aus Kostengründen nicht gleichgültig ist, an welcher Stelle einer Modellierung der Aufwand für die Zurichtung der konkreten Objekte und der Strukturidentifikation des Modells getrieben wird. Während das analytische Modellieren eine Integration von Wissen auf einer sehr „hohen“ Ebene erfordert, kann das Wissen von Operatoren, die ohnehin an der Anlage arbeiten, durch den Neuroinformatiker „billig“ verarbeitet werden. Im Gegensatz zur Zusammenarbeit des analytischen Modellierers mit Experten des jeweiligen Bereichs muß bei der konnektionistischen Modellierung nicht unbedingt eine gemeinsame Ebene gefunden werden.¹⁹⁰

Bei allen Mutmaßungen über veränderte Kompetenzverteilung zwischen verschiedenen Arten von Expertentum, sollte jedoch ein zentrales Anliegen jeder industriellen Verwertung formalisierten Wissens nicht aus dem Blick geraten: Eines der wichtigsten Ziele, das auch bei konnektionistischen Modellierung immer wieder genannt wird, ist es, nach Abschluß der Modellierung eine größere Unabhängigkeit von menschlicher Wissensanwendung zu gewinnen. Dabei steht keinesfalls immer nur der direkte Kostenaspekt, sondern vor allem auch die bessere Kontrollierbarkeit, die zeitlich unbegrenzte Einsatzfähigkeit und die vermeintlich konstantere Qualität algorithmisierter Steuerung technischer Systeme im Vordergrund. Daher kann es durchaus der Fall sein, daß zwar das Wissen von Bedienungspersonal zur Modellierung herangezogen wird, die vormaligen Wissensträger aber nach der Implementierung der konnektionistischen Prozeßführung deutlich verminderte Kompetenzen erhalten.

3.6.6 Konnektionistische Strickmuster – Neuro-Artefakte und ihre Verflechtungen mit anderen soziotechnischen Strukturen

In den vorigen Abschnitten wurde gezeigt, welche spezifischen Umordnungen von Welt in dem konnektionistischen Computerlabor vor sich gehen. Hier soll nun gefragt werden, welche Auswirkungen diese Rekonfigurationen auf technische Strukturen haben, die auf der Basis konnektionistischer Modellierung entwickelt werden. Dabei geht es vor allem darum, in welcher Weise diese „konnektionistischen Artefakte“ in ihre Umgebung eingebunden werden. Mit dieser Frage wird die eingangs aufgestellte These dieser Arbeit aufgenommen, daß technische Methoden als Verarbeitungsweisen von Welt immer auch „soziale Methoden“ sind, da sie materielle Komponenten in gesellschaftliche Strukturen einbinden und mögliche Umgangsweisen mit technischen Artefakten partiell determinieren. In Abschnitt 2.7 wurde als Kennzeichen solcher Umgangsweisen die Faktoren „Transparenz der Funktionsweise“, „Flexibilität gegenüber unvorhergesehenen Einwirkungen und verschiedenen Einsatzweisen“, „Komplexität der Kontrollstrategie“ und die „Eingriffsmöglichkeiten in die Entwicklung und Bedienung“ vermutet. Diese Punkte sollen nun für konnektionistischen Artefakte ebenso wie zuvor schon für die Produkte aus Modellierungen mit der Methode der Finiten Elemente und der Fuzzy-Logik untersucht werden.

189 Hier muß allerdings angemerkt werden, daß der zitierte Aufsatz eine wenig praxisbezogene Sichtweise auf konnektionistische Modellierung präsentiert. Die Trainingsdaten werden hier aus Formeln generiert, um so zu zeigen, daß das Netz den Zusammenhang gefunden hätte, wenn die Formel unbekannt gewesen wäre. Wie wenig dies meistens mit der Realität zu tun hat, wurde weiter oben gezeigt. In Wirklichkeit entstehen auch bei einer halbwegs sorgfältigen Neuro-Modellierung Kosten bei der Generierung der Trainingsdaten.

190 Dies gilt auch im Vergleich zu klassischen Expertensystemen, bei denen der Wissenserwerb sehr schwierig ist, da sämtliches Wissen in eine formale Sprache überführt werden muß.

Flexibilität

Angesichts der „Lernfähigkeit“ konnektionistischer Systeme läßt sich zunächst vermuten, konnektionistische Technik könne sich ihrer Umgebung durch das Lernen selbstständig anpassen. Damit wäre die im Zusammenhang mit der analytischen FEM-Modellierung diskutierte Problematik, daß auf spezielle Zwecke hochgezüchtete technische Systeme versagen, sobald einfache Verschiebungen in den Bedingungen eintreten, zumindestens entschärft. So schreibt etwa Sigrid Hafner (1994, S. 26):

„Das ‘on the job’ – Trainieren des Systems macht die explizite Berücksichtigung möglicher Störeinflüsse überflüssig, da das KNN selbst lernt, mit den Störungen in der Einsatzumgebung fertigzuwerden.“

Da, wie oben konstatiert wurde, bei der konnektionistischen Modellierung der erste Schritt immer an dem realen Prozeß vollzogen werden muß, ohne daß, wie bei der analytischen Modellierung, die konkreten Objekte im nachhinein in eine Modellstruktur eingepaßt werden, können keine unerwarteten Eigenschaften des realen Prozesses ein vorab konstruiertes Theorie-Modell über den Haufen werfen. Diese Offenheit gegenüber der vorgefundenen Umgebung besteht jedoch nur, solange die Lernphase noch nicht abgeschlossen ist. Das fertig trainierte Netz verfährt starr nach den gelernten Verarbeitungsmustern. Tritt plötzlich ein Zustand auf, der in den Trainingsdaten nicht enthalten war, können die Vorhersagen eines konnektionistischen Systems vollkommen aus dem Ruder laufen. Dies kann trotz sorgfältigen Trainings geschehen, wenn sich das modellierte System im Laufe der Zeit verändert. Solchen Überraschungen kann entgegengewirkt werden, indem das Netz laufend mit aktuellen Daten nachtrainiert wird. Dabei besteht allerdings die Gefahr, daß alte, schon gelernte Zusammenhänge wieder „vergessen“ werden.¹⁹¹ Ein solches Vorgehen wird als „Online-Lernen“ bezeichnet. In diesem Fall wird das Neuro-Modell zu einem adaptiven Modell. Ein solcher auf Dauer gestellter Abgleich zwischen Modell und realem System könnte als ein ständige Rückversicherung des Labors gegenüber der Realität interpretiert werden. Wenn die „Wirklichkeit“ sich verändert, reagiert das Modell sofort.

Dazu wieder Hafner (ebd.):

„Langsam veränderliche Prozeßparameter werden durch die inhärenten Adaptionseigenschaften der KNN selbsttätig ohne Bedienereingriff kompensiert.“¹⁹²

Dennoch kann auch beim Online-Lernen in keiner Weise von einem für jede Regung offenen Blick auf die „Realität“ die Rede sein. Das Lernen findet lediglich innerhalb eines fest gesteckten Rahmens statt. Die Aufnahmefähigkeit des konnektionistischen Modells ist, wie oben ausführlich beschrieben wurde, durch die Auswahl der Eingangsgrößen, die überhaupt gemessen werden, vorstrukturiert. Wenn plötzlich eine ganz neue Einflußgröße auftritt, kann auch das Online-Lernen dies nicht erfassen. Stattdessen kann in einem solchen Fall gerade eine besondere Gefahr in der Lernfähigkeit liegen. Das Modell versucht, sich anzupassen und der Fehler wird „vertuscht“. Daher nennen Hafner u. a. als Nachteil konnektionistischer Modellierung:

¹⁹¹ Vgl. zum „Stabilitäts/Plastizitäts Dilemma“ Seite 148.

¹⁹² Der Begriff „inhärent“ muß hier hinterfragt werden. Ob nämlich ein konnektionistisches System im Betrieb noch lernfähig ist, ist vor allem eine strategische Entscheidung der Technikentwickler. Vgl. dazu den Abschnitt „Eingriffsmöglichkeiten“ auf Seite 164.

„Unvorhergesehene Parametervariationen werden vom KNN kompensiert, obwohl gerade diese Abweichungen einen Hinweis auf ein ernstes Problem im betrachteten Prozeß geben können.“ (ebd., S. 28)

Eine Anpassung an die Umgebung findet somit bei einem konnektionistischen Modell zwar statt, die Wahrnehmung der Umgebung ist jedoch durch einen vorgegebenen Beobachtungsrahmen stark strukturiert. Wie vielen Aspekte des behandelten Wirklichkeitsausschnittes dieser Rahmen gerecht wird, hängt maßgeblich davon ab, wie viel lokales Wissen über dessen Eigenheiten in die Netzbildung einbezogen wurde. Wie mehrfach gezeigt werden konnte, kann die adäquate Auswahl der Trainingsdaten, die für einen zuverlässigen und flexiblen Betrieb eines Neuro-Artefakts unerlässlich ist, nur unter Einbeziehung einschlägiger Erfahrung gelingen. Gerade wegen der Universalität des konnektionistischen Modellierungsansatzes und seiner Anpassungsfähigkeit an beliebige Muster, bedarf es einer gezielten Lokalisierung, um ihn für konkrete Wirklichkeitsausschnitte fruchtbar zu machen. Allerdings muß es selbst bei einer gelungenen Vernetzung mit lokalem Wissen stets menschlicher Urteilskraft vorbehalten bleiben zu prüfen, ob die Bedingungen, unter denen der gesteckte Beobachtungsrahmen die Wirklichkeit angemessen repräsentiert, noch gegeben sind. Dies wird jedoch desto eher möglich sein, je mehr Akteursgruppen aktiv an dem Modellierungsprozeß beteiligt waren.

Gültigkeitsbereich

Die Problematik der Anpassungsfähigkeit konnektionistischer Modelle an die „Wirklichkeit“ ist eng mit der Frage nach dem Gültigkeitsbereich solcher Modelle verknüpft. Absolute Aussagen darüber, was die Bedingungen der Gültigkeit eines Neuro-Modells sind, können nicht getroffen werden. Innerhalb des durch Trainingsdaten abgedeckten Bereiches kann die Wahrscheinlichkeit, daß die Voraussagen des Modells zutreffen, durch eine sorgfältige Datenauswahl erhöht werden. Außerhalb dieses Bereiches ist die Unsicherheit sehr hoch.¹⁹³

Hier spiegelt sich eine grundsätzliche Eigenschaft von Black-Box Modellen wieder. Ohne ein explizites Wissen über die Wirkungszusammenhänge in dem modellierten System können auch keine Aussagen über die Grenzen seiner Anwendbarkeit getroffen werden. Besonders problematisch ist es, daß ein Neuro-Modell, im Gegensatz zu den meisten analytischen Modellen, außerhalb seines Gültigkeitsbereiches vollständig versagen kann. Dies ist, wie oben gezeigt wurde, vor allem dann fatal, wenn auf der Basis eines Neuro-Modells eine automatische Regelung stattfinden soll. Viele Autoren warnen daher davor, konnektionistische Systeme autonom agieren zu lassen. Damit gilt hinsichtlich des Gültigkeitsbereichs von Neuro-Modellen gleiches wie für die Anpassung an veränderte Umgebungsbedingungen. Nur eine starke Einbindung lokalen Wissens kann eine gewisse Sicherheit darüber bieten, daß Einsatzbereich und Gültigkeitsbereich sich überlagern. Wovon es abhängt, ob eine solche Vernetzung des Neuro-Modells mit lokalen Ressourcen möglich ist, wird im folgenden Abschnitt diskutiert.

Eingriffsmöglichkeiten

Eingriffe auf eine konnektionistische Modellierung sind, wie oben gezeigt wurde, vor allem bei der Konstruktion des Trainingsdatensatzes möglich und nötig. Dabei gilt für

¹⁹³ Vgl. Abschnitt 3.6.3.3.

die auf ein Neuro-Modell gestützte Optimierung technischer Systeme, ebenso wie für klassische Optimierungsverfahren, daß Kriterien dafür, was optimiert wird, nur dann eingehen können, wenn sie von vornherein in der Modellentwicklung berücksichtigt wurden. Dabei ist es offensichtlich, daß umso mehr Kriterien einbezogen werden können, je länger das Modell noch gestaltbar ist.

An welcher Stelle im tatsächlichen Entwicklungsprozeß von Neuro-Modellen diese Eingriffsmöglichkeiten jedoch vorhanden sind – ob nur im Labor oder auch am konkreten Einsatzort – ist keineswegs durch den Modellierungsansatz vorentschieden. Stattdessen gibt es hier erhebliche Unterschiede in den Realisierungsformen. Dabei spielt es eine große Rolle, welche Funktionen des Modellierens auf welche Weise in der Software verarbeitet sind, die zu der Modellierung verwendet wird. Dies wird sehr deutlich durch einige Ausführungen der schon oben erwähnten, für die Shell Petroleum konnektionistisch tätigen Autoren Cardon und Hoogstraten (1995) illustriert. Dabei geht es um die Frage, ob ein Netzwerk im Labor durch die Neuro-Experten fertiggestellt wird, oder ob Möglichkeiten gelassen werden, das Netz am Ort des Einsatzes zu modifizieren:

*„A fixed network, i.e. a network with a fixed architecture and frozen weights, has the advantage that the neural network expert can monitor all the training in the laboratory and that the user can use the network as a black box. The user does not need to know anything about the operation of the neural net. A disadvantage however, is that in the operational environment conditions often appear (slightly) different from the operational operations as assumed during the development of the neural net. If the differences are small enough (for instance in the case of the same problem but in different countries), some finetuning will solve the problem. **This however puts some extra demands on the flexibility of the exported network.** When the differences between the conditions assumed in the laboratory and the operational ones are expected to be large, a very flexible network with learning capability is necessary. This will allow for instance, the inclusion of new input parameters. **In this case, far more complex neural network software is needed as well as some neural-network knowledge at the location where the neural network is implemented**“ (S. 237 Hervorhebungen P.W.).*

Diese Ausführungen, die sich auf eine Klassifizierungsanwendungen beziehen, können voll und ganz auf eine konnektionistische Prozeßmodellierung übertragen werden. Eine Offenheit des Modells erfordert demnach eine komplexere Software und mehr Bewegung von Wissensträgern. Somit werden durch den Modellierungsansatz aber auch durch die Struktur der Modellierungs-Software die Eingriffsmöglichkeiten verschiedener Personengruppen an verschiedenen Orten mitbestimmt. Damit wird auch die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der entwickelten Technologien von diesen Faktoren beeinflusst. Je mehr das Modell dem von Latour¹⁹⁴ beschriebenen idealen Wissenstransporter, dem „Stabil-Mobil“, gleicht, desto weniger kann es an lokale Bedingungen noch angepaßt werden. Desto mehr allerdings – so meine These – muß die Umgebung an das Artefakt und damit an das Labor angeglichen werden.

194 Vgl. Abschnitt 1.4.

Laborausweitung: Kontrollaufwand und Umgestaltung der Umgebung

Ein wenig flexibles Netzwerk-Modell mit festen Vorgaben über die zu beobachtenden Größen und eingebauten Optimierungskriterien ist nicht unbedingt eines, das im Betrieb versagen wird. Eine Technologie, die auf einem solchen starren Neuro-Modell beruht, wird jedoch einen hohen Aufwand an technischen Maßnahmen erfordern, damit ihr Funktionieren garantiert ist. Die Umgebung, die in der Modellierung vorausgesetzt wurde, muß nun künstlich auch hergestellt werden, damit die Technologie in gewünschter Weise funktioniert. So muß ständig überwacht werden, ob das Modell noch im trainierten Bereich liegt. Hat man dagegen lokales Wissen in die Modellierung einbezogen, bleiben viele Kontrollmaßnahmen unnötig:

*„the total situation of free inputs could get far away from what had earlier been presented to the network. [...] but since all suggestions from the network during the test were **acknowledged by the operator**, much attention was not paid to this aspect“* (Deigaard 1995, S. 974, Hervorhebungen P.W.)

Die möglicherweise notwendigen Kontrollmaßnahmen beschränken sich nicht auf die Überwachung, sondern können auch eine „modellgerechte“ Umgestaltung des Prozesses beinhalten. Fehlen z. B. wesentliche Eingangsgrößen, so muß deren Einfluß durch entsprechende Zurichtungsmaßnahmen, wie etwa eine Vorverarbeitung des Materials, ausgeschaltet werden.

Transparenz

Black-Box Modelle, wie es die Neuro-Modelle sind, bieten keine Möglichkeit nachzuvollziehen, nach welchen Prinzipien sie arbeiten. Die Abläufe, nach denen innerhalb des Modells Informationen verarbeitet werden, sind weder für die beteiligten Modellierungsexperten noch für die Prozeßfachleute einsehbar. Neuro-Modelle können daher nicht als transparent bezeichnet werden. Weder können Ansätze, die auf einem Verständnis der wirkenden Prinzipien beruhen, in diese Modelle einfließen, noch ist es möglich, explizites Wissen aus ihnen zu gewinnen. Dennoch bietet gerade die eher einfache Art der Modellierung aus Beispielfällen die Möglichkeit, eine Transparenz der Wissensverarbeitung zu schaffen. Bei der Auswahl der Beispielfälle, nach denen das Modell lernt, können auch Nicht-Experten sinnvoll mitwirken. Versuche einer solchen Einbeziehung lokalen Wissens wurden hier mehrfach genannt. Damit besteht auch für die weitere Umgebung, wie z. B. für an der Technologieentwicklung zu beteiligende Laien, die Möglichkeit, Einfluß auf die Prioritäten, die mit der Modellierung verfolgt werden, zu nehmen. Bei der konnektionistischen Modellierung ist es in mancher Hinsicht einfacher, Einflüsse verschiedenster Art aufzunehmen, als bei der analytisch-mathematischen Modellierung, die dazu zwingt, das Wissen in einer sehr abstrakten Form zu formulieren. Allerdings zeigen die großen Unterschiede der Herangehensweisen, die hier präsentiert wurden, daß eine solche Transparenz der Modellgenerierung nur dann besteht, wenn sie aktiv von Seiten der Modellierer hergestellt wird. Ob dies möglich ist, hängt, wie gezeigt werden konnte, auch von der Gestalt der verwendeten Modellierungssoftware ab.

Fazit

Es wurden nun verschiedene Aspekte genannt, hinsichtlich derer der konnektionistische Modellierungsansatz die Eigenschaften der Technologien mitbestimmt, für deren Bearbeitung er herangezogen wird. Es zeigte sich dabei in ähnlicher Weise wie bei der

Fuzzy-Technologie, daß Modellierungsansätze zwar wesentliche Strukturierungen in den Prozeß der Verarbeitung von Welt einbringen, es aber durchaus möglich ist, diesen Strukturierungen unterschiedliche Wendungen zu geben. Dafür ist es aber notwendig, daß mit dem Modellierungsansatz bewußt als einem Verfahren der Rekonfiguration von Beziehungen zwischen Menschen und Dingen umgegangen wird. Gerade bei dem konnektionistischen Modellierungsansatz besteht jedoch die Gefahr, daß dieser als ein „neutrales“ Verfahren der Abbildung von Welt mißverstanden wird und so der konstruktive Aspekt der Modellierung aus dem Blick gerät. Technologien, die auf solchen unhinterfragten Neuro-Modellen beruhen, könnten sich als sehr sperrige Hindernisse erweisen, wenn es darum geht, eine Vielfalt von Konstruktionsweisen dieser Beziehung zuzulassen. Gerade der Black-Box Charakter des Neuro-Modells wird in solchen Fällen dazu führen, daß ein hoher Kontrollbedarf besteht, der nachträglich kaum noch in Frage gestellt werden kann. Ist die konnektionistische Modellierung jedoch noch im Entstehen, bestehen hinsichtlich der Aufnahme lokalen Wissens Möglichkeiten, welche die physikalisch-mathematische White-Box Modellierung wegen ihres hohen Abstraktionsgrades nicht zuläßt. Wird bewußt versucht, diese Möglichkeiten zu nutzen, können technische Systeme entstehen, die auch hinsichtlich ihrer Einbindung in ein gesellschaftliches Dispositiv „adaptiv“ und „lernfähig“ sind.

3.7 Die drei Modellierungsverfahren im Vergleich

Es wurden hier mit der „Methode der Finiten Elemente“ (FEM), der „Fuzzy-Modellierung“ und der „Konnektionistischen Modellierung“ (KNN) drei sehr verschiedene Verfahren vorgestellt, mit denen in der Technikentwicklung Ausschnitte von Welt formalisiert werden. Alle drei Ansätze produzieren mathematische Modelle, die in einem Computer implementiert werden können und dort die Basis für eine computergestützte Untersuchung der modellierten Strukturen bilden. Es wurde an zahlreichen konkreten Beispielen gezeigt, wie auf der Grundlage solcher „Computersimulationen“ technische Systeme entwickelt werden. Dabei wurde die These verfolgt, daß Modellierung und Computersimulation Instrumente der Technikentwicklung sind, mit denen nicht nur technische Artefakte sondern gleichzeitig auch soziale Strukturen umgestaltet werden. Die Modellierung wurde daher in dieser Untersuchung als ein Vorgang soziotechnischer Rekonfiguration interpretiert. Jeder der drei behandelten Modellierungsansätze wurde als eine Kette von Übersetzungen heterogener Elemente in formale Strukturen beschrieben. Dabei wurde untersucht, an welchen Stellen über Grenzziehungen und Umordnungen Zwecke in die Modellierung eingehen und die Modellstruktur selbst beeinflussen. Ein wichtiger Aspekt dieser Analyse war die Frage, wie der Prozeß der Verobjektivierung von Wissen über Welt durch den Modellierungsansatz strukturiert wird. Daher wurde gefragt, welche Gruppen von Akteuren bei der Modellierung Wissen einbringen können und in welche Form dieses Wissen gefaßt ist. Der Computer als Zielplattform für die beschriebenen Umordnungen wurde in Analogie zu dem zentralen Ort naturwissenschaftlicher Rekonstruktion von Welt als ein „Labor“ interpretiert. Die Umformungen der Außenwelt, die für die Einhaltung der Gültigkeit der im „Computerlabor“ erzielten Ergebnisse notwendig werden, wurden als „Ausweitung des Computerlabors auf die Welt“ aufgefaßt. Für jedes Verfahren wurden charakteristische Zusammenhänge zwischen dem Modellierungsansatz, dem Verlauf der darauf basierenden Technikentwicklung und den Eigenschaften der entwickelten technischen Systeme aufgezeigt. Dabei wurde vor allem nach der Einbindung der Technologien in gesellschaftliche Strukturen gefragt.

Im folgenden sollen die Ergebnisse, die für die einzelnen Verfahren erarbeitet wurden, miteinander verglichen werden, um anschließend einige Aussagen zu den aufgestellten Thesen machen zu können. Der Vergleich wird dabei nach den zentralen Themenkomplexen: „Modellierung als Rekonfiguration“, „Modellierung als Strukturierung von Wissensanwendung“ und „Eigenschaften simulationsbasierter Artefakte“ gegliedert sein.

3.7.1 Rekonfigurationen im Computerlabor

Für jedes der drei untersuchten Modellierungsverfahren hat sich gezeigt, daß der über die Formalisierung erreichte Transport in den Computer die Möglichkeiten technischer Intervention in Welt erheblich ausweitete. Dabei erwies sich nicht so sehr die prinzipielle Neuartigkeit der erzielten Eingriffsmöglichkeiten in die Welt sondern die Beschleunigung und Effektivierung dieses Eingriffs als die entscheidende Veränderung.¹⁹⁵ Es ließ sich zeigen, daß das „Computerlabor“ als ein wirkmächtiges „Stabil-Mobil“¹⁹⁶ fungiert, das die effektive Beherrschung heterogener Elemente von weni-

¹⁹⁵ Vgl. für die Fuzzy-Modellierung Abschnitt 3.5.5 auf Seite 113 und für FEM Seite 92.

¹⁹⁶ Eine Einführung dieser an Bruno Latour angelehnten Begrifflichkeit findet sich in Abschnitt 1.4.

gen Zentren aus befördert. Beschleunigte Mobilisierungen und Maßstabsverschiebungen über Modellierung und Computersimulation werden vor allem dadurch ermöglicht, daß mit der digitalen Informationscodierung eine einheitliche Form für die unterschiedlichsten Einschreibungen zur Verfügung steht.¹⁹⁷ Zugleich mit der „Stabil-Mobilisierung“ erhöht sich jedoch die Anzahl der notwendigen Transformationen, denen die behandelten Weltausschnitte unterworfen werden. Diese technische Rekonstruktion von Welt ist von den gesellschaftlichen Rahmenbedingungen maßgeblich geprägt. Mit jedem im Verlauf einer Modellierung vorgenommenen Übersetzungsschritt werden daher neue Weisen der Einbindung materieller Elemente in soziale Strukturen produziert. Diese Funktionsweise von Modellierung als Praxis der Umordnung soziotechnischer Strukturen konnte für jeden Modellierungsansatz aufgewiesen werden. Die Linien, entlang derer diese Rekonfigurationen stattfinden, verlaufen jedoch in signifikanter Weise unterschiedlich.

Drei Wege in das Computerlabor

Die Modellierungsansätze unterscheiden sich fundamental darin, wie die behandelten Weltausschnitte für die Übertragung in den Computer verarbeitet werden. Methoden der analytischen Modellierung, wie die FEM, zielen als White-Box Verfahren auf die Konstruktion von Modellen, die explizit die Wirkungszusammenhänge innerhalb der betrachteten Strukturen beschreiben.¹⁹⁸ In diesem Sinne wird ein „besseres Verständnis“ der „inneren Prinzipien“, nach denen materielle Strukturen sich verhalten, angestrebt. Auf der Basis solcher Modelle können sehr gezielte Beeinflussungen der behandelten Systeme vorgenommen werden. Analytische Modelle werden durch deduktive Ableitung aus den allgemeinen naturwissenschaftlichen Weltbeschreibungen gewonnen. Dabei können alle Phänomene, für die eine mathematisch faßbare naturwissenschaftliche Theorie existiert, und solche, die in einer anschlußfähigen mathematischen Form beschrieben werden können, in die Modellierung eingehen. Um jedoch ein Modell zu erhalten, das die gewünschten Zugriffe auf das System ermöglicht, müssen von Beginn an explizite Grenzziehungen vorgenommen werden. Außerdem muß eine bewußte Auswahl der in das Modell aufzunehmenden Aspekte getroffen werden. Durch diese Transformationen werden bei der analytischen Modellierung Zwecke und Interessen in die Modellstruktur übersetzt.¹⁹⁹ Die zweckorientierte Rekonstruktion von Welt wird hier vergleichsweise explizit vollzogen. Die Untersuchung der FEM-Modellierung hat jedoch gezeigt, daß dieser „lehrbuchmäßige“ Anteil analytischer Modellierung längst nicht ausreicht, um praktisch relevante und wirkmächtige Weltbeschreibungen zu konstruieren. Ein entscheidender Schritt auf dem Weg zum einsatzfähigen FEM-Modell war die praktische Bestimmung von Modellparametern und die Aufnahme empirisch gewonnener Beschreibungen von Phänomenen, für die kein naturwissenschaftlicher Beschreibungsansatz vorliegt. Für die analytische Modellierung muß – dies haben die Ausführungen zur FEM-Modellierung gezeigt – diese Integration phänomenologischer Modellanteile als der entscheidende Brückenschlag zu der widerspenstigen Welt lokal divergierender, unendlich vielfältiger Phänomene verstanden werden.²⁰⁰ Dabei stößt die notwendige einheitli-

¹⁹⁷ Vgl. Seite 94.

¹⁹⁸ Zur Begrifflichkeit Black- und White-Box Modellierung vgl. Abschnitt 1.3.1.

¹⁹⁹ Vgl. allgemein für die analytische Modellierung Seite 45 f. und speziell für die FEM Abschnitt 3.4.3.

²⁰⁰ Vgl. Seite 61, Seite 63 und Seite 91.

che Konzeptualisierung aller dieser Modellanteile bei Modellierungsverfahren wie der FEM einen Lernprozeß über Äußerungsweisen des behandelten Weltausschnittes an.

Bei der konnektionistischen Modellierung, die in Abschnitt 3.6 vorgestellt wurde, ist die Herangehensweise an die Beschreibung von Zusammenhängen in der Welt eine grundsätzlich Andere. Als Black-Box Verfahren beginnt diese Methode bei der Beobachtung einer Vielzahl einzelner Ereignisse in den zu modellierenden Systemen. Mit dem „Neuronalen Netz“ wird dann eine Struktur gebildet, die das beobachtete Verhalten reproduziert. Die Struktur dieses Modells, etwa die Anzahl der „Schichten“ oder „Neuronen“ des Netzwerkes, korrespondiert auf keine für ein menschliches Weltverständnis nachvollziehbare Weise mit der Struktur der behandelten Weltausschnitte. Auch die Parameter, die über vorgegebene Algorithmen aus den beobachteten Daten bestimmt werden, haben keine bedeutungsvolle Entsprechung in der Welt.²⁰¹ Lediglich die Ein- und Ausgangsgrößen eines konnektionistischen Modells können sinnvoll interpretiert werden. Im Verlauf der Modellierung, die in weiten Teilen als ein „Trial and Error“ Prozeß verläuft, werden jedoch immer wieder neue Erkenntnisse darüber gewonnen, welche Größen in die Modellierung einbezogen werden müssen, damit das Modell „funktioniert“. Insofern wird auch hier, wie von Morrison und Morgan (1999) beschrieben²⁰², durch die Modellierung eine spezifische Weise von Systemverständnis entwickelt. In den induktiven Prozeß der konnektionistischen Modellbildung kann jede „Äußerung“ von Welt eingehen, die sich mit dem verfügbaren Instrumentarium messen läßt.²⁰³ Die konnektionistische Modellierung ist daher nicht in erster Linie durch die Grenzen theoretischer Konzeptualisierungen von Welt, aber dafür in sehr hohem Maße durch technische Rahmenbedingungen strukturiert.²⁰⁴ Während eine analytische Modellierung auch ohne jedes weitere Hilfsmittel „auf dem Papier“ stattfinden kann, ist für eine konnektionistische Modellierung die Messung von Daten unerläßliche Voraussetzung. Der wesentliche Angriffspunkt für zweckbestimmte Strukturierungen der konnektionistischen Modellierung ist daher die Konzeption der gezielten Beobachtung des behandelten Systems. Vor allem bei der Auswahl der hierbei zu berücksichtigenden Größen gehen in der konnektionistischen Modellierung einerseits das Wissen über das System und andererseits die Zweckorientierungen in die Modellbildung ein.²⁰⁵ Hier liegt ein wesentlicher Unterschied zur analytischen Modellierung, bei der, wie oben beschrieben, die Bestimmungen der Modellstruktur und der Modellparameter die wesentlichen Eingriffsmöglichkeiten bieten.

Als ein weiteres Verfahren zur computergerechten Formalisierung von technisch relevanten Zusammenhängen in Weltausschnitten wurde in Abschnitt 3.5 die Fuzzy-Modellierung vorgestellt. Dieses Verfahren zielt auf die Nachbildung menschlicher Beobachtung von Welt. Mit Hilfe der von der Fuzzy-Logik bereitgestellten Algorithmen sollen natürlichsprachliche Beschreibungen der von Menschen beobachteten Zusammenhänge zwischen festgelegten Ein- und Ausgangsgrößen der behandelten Systeme formalisiert werden. Wie bei dem konnektionistischen Modell ist im Gegensatz zur analytischen Modellierung keine Beschreibung der inneren Wirkungsprinzi-

201 Vgl. Abschnitt 3.6.4.2.

202 Vgl. Seite 16.

203 Vgl. Seite 153.

204 Vgl. Seite 149.

205 Vgl. Seite 164.

prien des Systems angestrebt. Anders als das konnektionistische System wird jedoch das Fuzzy-Modell nicht über die direkte Anpassung einer elektronischen Struktur, sondern durch die Rekonstruktion von Regeln, die das Systemverhalten oder den adäquaten Umgang mit dem System beschreiben, gewonnen. Vom Prinzip her kann ein Fuzzy-Modell daher – im Gegensatz zu dem „Neuronalen Netz“ – auch ohne Messung, nur durch die Befragung von Personen erstellt werden. Das Fuzzy-Modell und seine Parameter haben dann eine Bedeutung auf der dem System äußerlichen Beschreibungsebene des menschlichen Beobachters. Die Kennzeichnung von Fuzzy-Logik Modellierung als Black-Box oder White-Box Verfahren ist daher nicht eindeutig. Die Untersuchung hat allerdings gezeigt, daß die überwiegende Mehrzahl der Fuzzy-Anwendungen ohnehin auf die sprachliche Beschreibungsebene verzichtet und automatisierte Algorithmen zur Regelfindung einsetzt.²⁰⁶ Für diese Art von Fuzzy-Modellierung gelten die Ausführungen zur konnektionistischer Modellierung hinsichtlich der strukturierten Verarbeitung von Welt entsprechend. Beide Modellierungsverfahren bieten dann als „universelle Approximatoren“ wirkmächtige Formalismen zur Übertragung gemessenen Systemverhaltens in digitale Codes. Auch eine linguistisch orientierte Fuzzy-Modellierung bringt jedoch spezifische Strukturierungen des verarbeiteten menschlichen Wissens mit sich. So muß dieses in einer bestimmten Form gefaßt sein, um in die „Regelbasis“ des Fuzzy-Modells eingehen zu können. Aus der Reichhaltigkeit menschlichen Wissens über Welt kann lediglich eine präformierte Sammlung von Handlungsanleitungen aufgenommen werden.²⁰⁷ Auch die Notwendigkeit der Meßbarkeit aller eingehenden Größen bringt eine starke technische Strukturierung der Modellierung mit sich, so daß diese der Vielfalt und Flexibilität menschlicher Beobachtung nicht gerecht werden kann. Wesentliche zweckorientierte Schritte der Fuzzy-Modellierung sind die Auswahl der Ein- und Ausgangsgrößen sowie die Bestimmung der Operatoren und Algorithmen zur Regelauswertung.²⁰⁸

Soziale Konstitution der Methodenwahl

Es ist deutlich geworden, daß die drei behandelten Modellierungsverfahren sehr unterschiedlich an die zu formalisierende Welt herangehen. Gleichzeitig unterscheiden sich jedoch die Verfahren nach außen hin vor allem darin, daß sie für sehr verschiedene Problemstellungen der Technikentwicklung herangezogen werden. Während etwa die Fuzzy-Modellierung besonders für Konsumtechnologie eingesetzt wird, findet die konnektionistische Modellierung vor allem bei der Behandlung sehr großer technischer Anlagen Anwendung. Bei diesen beiden Verfahren steht als Anliegen der Modellierung meist die Entwicklung von Regelungskonzepten für die entwickelten technischen Systeme im Vordergrund. Demgegenüber wird die FEM-Modellierung schwerpunktmäßig für die Optimierung der Struktur technischer Systeme eingesetzt. Bei näherer Betrachtung der Umstände der jeweiligen Anwendungen hat sich jedoch gezeigt, daß diese „Spezialisierungen“ nicht allein durch technische Notwendigkeiten zu erklären sind. Vielmehr haben die Einzeluntersuchungen Hinweise darauf gegeben, daß sich der Zusammenhang zwischen Gegenstandsbereich und Methodenwahl als ein sozial konstituierter begreifen läßt. So zeigten einige der

206 Vgl. Seite 118.

207 Vgl. Abschnitt 3.5.7.

208 Vgl. Abschnitt 3.5.12.

untersuchten Fallbeispiele, daß die Modellierungsansätze für eine Aufgabenstellung in Konkurrenz stehen können. Bei der Wahl des Modellierungsverfahrens spielten ganz verschiedenartige Faktoren eine Rolle. Vor allem waren es häufig Kosten-Argumente, die bei der Entscheidung für oder gegen ein Modellierungsverfahren den Ausschlag gaben. Welcher finanzielle Einsatz für eine Modellierung in Kauf genommen wird, hängt jedoch vor allem von den sozialen Rahmenbedingungen der Technikentwicklung ab. So bieten analytische Modelle gegenüber allen anderen Verfahren ein Höchstmaß an definierbaren Eingriffsmöglichkeiten in die behandelten Strukturen. Gleichzeitig ist jedoch ihre Erstellung und Umsetzung aufwendig und kostenintensiv. Dies gilt umso mehr, je komplexer das zu modellierende System ist. Ob der erhöhte Kontrollgewinn den Einsatz rechtfertigt, hängt von den zu erzielenden Gewinnen ab. So lohnt sich für die in privaten Haushalten eingesetzte kurzlebige Haushaltstechnologie keine aufwendige mathematische Modellierung²⁰⁹, wohl aber für ein Kampfflugzeug. Für einen sehr komplizierten Vorgang wie etwa die Verbrennung in einem Düsentriebwerk wird der hohe Aufwand einer analytischen Modellierung nicht gescheut, wenn die geringste Effektivierung der Verbrennung eine Geschwindigkeitssteigerung oder eine hohe Brennstoffersparnis bedeutet. Vor allem bei der Entwicklung von Konsumtechnologie und deren Steuerungsstrategien kommt noch hinzu, daß kulturell und sozial bedingte Vorstellungen von der Nutzung der Artefakte die Ansprüche an die Technikentwicklung bestimmen. Dies schlägt sich, wie besonders die Untersuchung der Fuzzy-Modellierung gezeigt hat, auch in der Auswahl des Modellierungsansatzes nieder.²¹⁰ Auch bei industriell genutzter Produktionstechnologie gibt der kulturelle und soziale Kontext spezifische Vorstellungen über die Organisation menschlicher Arbeit und damit Entwicklungskriterien vor, die sich nicht vollständig auf ökonomische Interessen zurückführen lassen.

Der Zusammenhang zwischen Modellierungsansatz und Modellierungskosten muß zudem selbst als ein von sozialen Faktoren bedingter verstanden werden. Wie hoch nämlich die Kosten einer Modellierung sind, hängt in hohem Maße davon ab, „Wer“ „Wessen Wissen“ verarbeitet. Von welcher Art Modelliererwissen und modelliertes Wissen sind ist zwar, wie alle drei Untersuchungen gezeigt haben und unten noch ausgeführt werden wird, wesentlich von dem Modellierungsansatz abhängig. Wie hoch dabei aber das jeweilige Wissen bezahlt werden muß, ist das Ergebnis gesellschaftlicher Machtverhältnisse. So ist die analytische Modellierung vor allem deswegen so kostspielig, weil sie durch hochspezialisierte, akademisch ausgebildete Experten durchgeführt werden muß. Je komplexer eine Modellierungsaufgabe ist, desto teurer muß dieses Wissen eingekauft werden. Ein großer Stahlofen kann daher billiger modelliert werden, wenn mit der Hilfe des ohnehin verfügbaren Wissens der Bediener ein konnektionistisches Modell entwickelt wird, als wenn eine Garde von teuren Chemikern und Physikern versuchen würde, den Gesetzmäßigkeiten der Schmelzvorgänge auf die Spur zu kommen. Andererseits wird die Ermittlung expliziten menschlichen Wissens auch dann teuer, wenn es mit großen Aufwendungen von vielen einzelnen Personen, deren Mitwirkung nicht unbedingt garantiert ist, gewonnen werden muß. Dies führte etwa bei der Fuzzy-Logik dazu, daß der linguistische Ansatz

²⁰⁹ Vgl. Abschnitt 3.5.5.

²¹⁰ Vgl. Seite 114.

fusseliger Wissensformalisierung gegenüber dem mathematisch orientierten „Fuzzy Engineering“ zurückgedrängt wurde.

Ein häufig angeführter Grund für die Wahl eines bestimmten Modellierungsansatzes und auch für die Anwendung von Computersimulation überhaupt, sind Gewinnerhöhungen durch das Erlangen eines Zeitvorteils. So wird für Fuzzy-Logik oder konnektionistische Modellierung sehr oft als Vorteil genannt, daß sich mit ihrer Hilfe schnell funktionierende Modelle entwickeln lassen, während die analytische Modellierung als sehr zeitaufwendig gilt. Auch diese Beschleunigung technischer Formalisierung wurde in der Untersuchung als ein sozial konstituiertes Phänomen beschrieben. So ist beispielsweise eine Fuzzy-Modellierung nur dann „schnell“, wenn nur ein geringes Maß an Modellgenauigkeit verlangt ist und nur wenig Aufwand für die Wissensbeschaffung getrieben wird und auch eine konnektionistische Modellierung wird desto zeitaufwendiger, je mehr Sorgfalt auf die Auffindung der relevanten Trainingsdaten verwendet wird. Ob solche Aufwendungen an Entwicklungszeit in Kauf genommen werden, hängt jedoch ebenso wie der finanzielle Einsatz davon ab, ob sich die dadurch zu erzielenden Verbesserungen in der Technologie auszahlen.

3.7.2 Modellierung und Wissensstrukturierung – Simulation und Partizipation

Ein Anliegen der Untersuchung war es, die Modellierungsverfahren darauf zu untersuchen, welche Art von Wissen mit ihrer Hilfe verarbeitet wird. Damit verknüpft war die Frage nach möglichen Formen der Beteiligung verschiedener Akteursgruppen an dem Modellierungsprozeß. Dabei hat sich zunächst die zu Beginn der Arbeit in Abschnitt 1.4.2 aufgestellte Vermutung bestätigt, daß sich in einem streng epistemologischen Sinne keine eindeutige Aussage darüber machen läßt, welche Form von Wissen Computersimulation und Modellierung zugrunde liegt. Zwar gewinnt mit der Verbreitung von simulationsbasierter Technikentwicklung computerspezifisches Wissen, etwa über die Eigenschaften verschiedener Chiptechnologien, über den computergerechten Einsatz von Sensortechnik oder über die Anwendung numerischer Methoden an Bedeutung. Mit dieser Erweiterung um neue Inhalte geht jedoch keine Etablierung einer spezifischen Wissensform in der Technikentwicklung einher. In allen drei Verfahren spielen sowohl personengebundenen Erfahrungswissen als auch Ergebnisse von Beobachtungen und Experimenten neben analytischer Deduktion aus abstrakten Prinzipien eine wichtige Rolle.²¹¹ Wegen der Wichtigkeit von klassischen Laborexperimenten für jede Art von Computersimulation behalten auch praktische Fähigkeiten und Fertigkeiten unverändert eine große Bedeutung bei der Generierung technisch verwertbaren Wissens. In Abschnitt 1.4.2 wurde jedoch ein soziologisch orientierter Wissensbegriff eingeführt, der es erlaubt, auch Änderungen in der Art und Weise des Zugriffs verschiedener Akteursgruppen auf Wissensbestände als Veränderung der Wissensform zu fassen. Im Sinne dieses Wissensbegriffes liessen sich in den Untersuchungen der einzelnen Modellierungsansätze durchaus qualitative Verschiebungen in der Generierung und Anwendung technischen Wissens feststellen. So konnte gezeigt werden, daß der Modellierungsansatz eine starke Strukturierung dafür vorgibt, in welchem „Format“ das Wissen vorliegen muß, das in den Modellierungsprozeß eingehen kann. Dadurch wurden auch die Möglichkeiten verschiedener

²¹¹ Zur dieser Thematik vgl. vor allem die Abschnitte 3.4.10 (FEM), 3.5.8 (Fuzzy) und 3.6.5 (KNN).

Akteursgruppen, bei der Modellierung mitzusprechen, verschoben. Die Ermittlung dieses Zusammenhanges zwischen Modellierungsverfahren und den Möglichkeiten für Einblicke und Eingriffe in die Technikentwicklung ist für die Steuerung technischer Entwicklungen von zentraler Bedeutung. Daher wurden die Fragen nach der Transparenz der Modelle und den Eingriffsmöglichkeiten in die Modellierung für jeden Ansatz ausführlich diskutiert.²¹² Bei der folgenden kurzen Zusammenfassung der Ergebnisse sollte allerdings im Blick behalten werden, daß eine praxisrelevante Modellierung niemals im luftleeren Raum, sondern immer in einem vorstrukturierten Kontext von Technikentwicklung stattfindet. Daher verbinden sich stets verschiedene Ebenen bei der Strukturierung von Wissensgenerierung. Die sozialen Rahmenbedingungen der Technikentwicklung sind für die Durchführung der Modellierung ebenso maßgeblich, wie es oben für die Auswahl des Modellierungsansatzes festgestellt wurde. Zwar geben die einzelnen Verfahren gewisse Strukturierungen vor, stets sind jedoch sehr verschiedene Wendungen der Potenziale und Beschränkungen der einzelnen Methoden möglich. So hängt etwa die Offenheit einer Modellierung gegenüber Einflüssen von Nicht-Experten vor allem von dem Willen der Akteure ab, solche Einflüsse überhaupt zuzulassen. Wie solche gezielten Öffnungen oder Schließungen vor sich gehen können, ist jedoch durchaus von dem ausgewählten Verfahren der Modellierung abhängig. Im Einzelnen konnten folgende charakteristische Zusammenhänge zwischen Modellierungsansatz und Formen möglicher Eingriffe in den Prozeß der Modellierung herausgearbeitet werden:

Das Neuro-Modell – Was wird gemessen?

Bei der konnektionistischen Modellierung ist der wesentliche Schritt, in dem Zwecke in das Modell einfließen, die Auswahl des „Trainingsdatensatzes“. An diesem Punkt der Modellierung müssen daher Kriterien eingebracht werden, die in der modellbasierten Technikgestaltung berücksichtigt werden können. Soll etwa bei der Entwicklung einer Technologie deren Lärmausstoß ein Entwicklungskriterium sein, so müssen bei der Modellierung entsprechende Werte gemessen und in Form eines passenden Datensatzes in das Training eingebracht werden. In einem Neuro-Modell kann also nur mitsprechen, wer einen Datensatz präsentieren und sich ein Eingangsneuron sichern kann. Um solche Daten generieren zu können, muß ein geeignetes technisches Instrumentarium zur Verfügung stehen und in der „Trainingsphase“ ein Zugriff auf die Netzstruktur möglich sein. Explizites Wissen über Wirkungszusammenhänge innerhalb der modellierten Weltausschnitte kann in eine konnektionistische Modellierung nur über erhebliche Umwege eingehen.²¹³

Fuzzy-Modellierung – Wer wird wie und wonach gefragt?

In eine Fuzzy-Modellierung kann prinzipiell jegliches Wissen über das Systemverhalten eingehen, das sich in der Form von „Wenn...Dann“ Regeln fassen läßt. Wie differenziert die Möglichkeiten zu einer Formulierung und Auswertung der Regelbasis sind, hängt von dem Formalisierungssystem und darin vor allem von den Inferenzoperatoren ab. Entscheidend ist es jedoch vor allem, nach welchen Ein- und Ausgangsgrößen überhaupt gefragt wird.²¹⁴ Nur diejenigen Größen, für die nach dem „Wenn“ eine Eingabe vorgesehen ist, können in die Systembeobachtung eingehen. Nur solche,

²¹² Vgl. Seite 96 (FEM), Seite 131 (Fuzzy) und Seite 164 (KNN).

²¹³ Vgl. Seite 153.

²¹⁴ Vgl. Seite 129.

die nach dem „Dann“ stehen, können mit dem Modell beeinflußt werden. Auf diese Weise strukturiert das formale Gerüst hier ähnlich wie bei der konnektionistischen Weltabbildung die möglichen Inhalte des Modells. Darüber hinaus hat es sich gezeigt, daß es bei der praktischen Anwendung der Fuzzy-Logik sehr darauf ankommt, „wer“ überhaupt befragt wird. In gleicher Weise wie die Formatierung der Wissensinhalte muß die gezielte Auswahl der einbezogenen Wissensträger als entscheidende Strukturierung der Technikentwicklung betrachtet werden. Ob nur die Entwicklungsingenieurinnen ihre eigenen Regeln in den Computerchip programmieren oder jeder „Kühlschrankbenutzer“ die Möglichkeit hat, eine eigene Regel aufzustellen, macht entscheidende Unterschiede fusseliger Weltverarbeitung aus. Auch in industriellen Anwendungen kommt es für die Richtung der gesamten modellbasierten Technikentwicklung darauf an, wessen Wissen überhaupt abgefragt wird. Wenn auf die sprachliche Formulierung ganz verzichtet wird, was zunehmend bei der Fuzzy-Anwendung der Fall zu sein scheint, verkleinert sich der Kreis der Wissensanteile, die in die Modellierung aufgenommen werden können, drastisch. Wie bei der konnektionistischen Modellierung wird in diesem Fall die Bestimmung der in die automatische Regelfindung eingehenden Ein- und Ausgangsgrößen zum wichtigsten und für alle Nicht-Experten auch einzig möglichen Eingriffspunkt.

Finite Elemente – Wer kann mitsprechen?

Bei analytischen Modellierungsverfahren wie der FEM fließen Zweckorientierungen zunächst vor allem in die explizite Grenzziehung und die Auswahl der zu modellierenden Aspekte ein. An dieser Stelle müssen also auch die Kriterien eingebracht werden, die in die betreffende Technikentwicklung eingehen sollen. Diese müssen auf der Ebene naturwissenschaftlicher Konzeptualisierungen von Welt formuliert werden. Dies ist für eine große Zahl von Kriterien, wenn überhaupt, nur mit der Hilfe von sehr speziellem Expertenwissen möglich.

Die Untersuchung der FEM-Modellierung hat gezeigt, daß ein aufwendiger Prozeß der wechselseitigen Anpassung zwischen Modell und beschriebenem Weltausschnitt stattfindet, um praxisrelevante Modelle zu erzeugen. Dabei spielen vor allem auch empirische Modellanteile eine entscheidende Rolle, deren Generierung eng mit den praktischen Problemstellungen des Anwendungsfeldes verbunden ist. In jedem Schritt finden hier zweckorientierte Transformationen und Übersetzungen statt. Diese lassen sich nur in einer intensiven Auseinandersetzung mit den Eigenheiten des Anwendungsgebietes und der Methode mitsamt der zu deren Einsatz verwendeten Software gezielt beeinflussen. In der Untersuchung ist es somit deutlich geworden, daß die analytische „White-Box“ zahlreiche trübe Stellen aufweist, die nur mit großem Aufwand aufgehellt und gestaltet werden können.

Transparenz

Während der erste Anschein zunächst vermuten ließ, White-Box Modelle seien prinzipiell durchsichtiger als ihre schwarzen und grauen Konkurrenten, hat sich gezeigt, daß das Verhältnis zwischen Formalisierungsweise und Transparenz durchaus verwikelt ist. So stellte sich heraus, daß die White-Box dem „Laien“ wegen des hohen Abstraktionsniveaus in vielen Fällen kaum zugänglich ist, während das völlig schwarze Neuro-Modell sich leichter auch von Nicht-Experten gestalten läßt. Es wurde jedoch deutlich, daß jedes Verfahren Möglichkeiten einer partizipativen Modellierung, aber auch Wege zur Verdunklung der Entscheidungsprozesse anbietet.

Transparenz muß stets bewußt hergestellt werden. Dabei bedeutet eine Offenlegung von einigen Modellaspekten oft eine gleichzeitige Verdunklung anderer Gesichtspunkte. Transparenz muß daher immer im Zusammenhang mit den Interessen der beteiligten Akteure bewertet werden.

Software als strukturierende Instanz

Alle beschriebenen Strukturierungen der Umsetzung technischen Wissens durch Modellierungsansätze werden nicht allein von bloß formalen Verfahrensvorschriften getragen. Da die Mehrzahl der Simulationsanwendungen mit der Hilfe von kommerzieller Simulationsoftware durchgeführt werden, sind die Vorgaben des Modellierungsverfahrens für den einzelnen Anwender über diese Software vermittelt und werden dabei von deren spezifischen Strukturierungen überlagert.²¹⁵ Solche Überlagerungen konnten für alle drei Ansätze aufgewiesen werden. So kann bei der FEM die Vorgabe einer Elementform es unmöglich machen, manche Zusammenhänge in das Modell zu integrieren. Bei der konnektionistischen Modellierung war es von der Software abhängig, in welcher Phase der Technikentwicklung das Modell noch lernfähig war, was entscheidende Bedeutung für die Möglichkeiten der Wissensintegration verschiedener Akteursgruppen hatte. Bei der Fuzzy-Modellierung schließlich bestimmten die von der Software vorgegebenen Operatoren welche Formen von „Regeln“ in die Regelbasis des Modells übernommen werden können. Ähnlich wie bei der konnektionistischen Modellierung war es hier von den Möglichkeiten der Software abhängig, ob nur die Entwicklungsingenieurin oder auch der Techniknutzer bei der Erstellung der Regelbasis mitwirken kann. Die Simulationssoftware muß demnach als eine eigene strukturierende Instanz im Modellierungsprozeß verstanden werden. Diese Instanz ist selbst ein Produkt spezifischer Gruppen von Akteuren. Diese sind allerdings in der Regel weniger in Prozessen der Technikentwicklung als vielmehr in der Computerprogrammierung involviert.²¹⁶ Daher läßt sich vermuten, daß sich mit der zunehmenden globalen Verbreitung kommerzieller Software als Basis computergestützter Technikentwicklung eine Ebene der Wissensstrukturierung etabliert, die weniger an die unmittelbaren Orte und Personen der Technikentwicklung und noch weniger an die der Technikanwendung gebunden ist.²¹⁷

Modellierung und Finalisierung

Im Zusammenhang mit der Analyse der FEM wurde herausgearbeitet, daß die Ergebnisse der Finalisierungstheorie über die „gesellschaftliche Orientierung des wissenschaftlichen Fortschritts“²¹⁸ auch für die simulationsgestützte Generierung technischen Wissens Gültigkeit haben.²¹⁹ Daraus ergab sich, daß auch für die Beeinflussung der Richtung simulationsbasierter technischer Entwicklungen nach wie vor

215 Vgl. besonders Abschnitt 3.4.8 und Seite 98 für FEM sowie Seite 164 für KNN.

216 Vgl. für FEM Seite 98 und Anmerkung 84.

217 Henry Petroski zitiert einen einflußreichen kanadischen Bauingenieur, der sich zu dieser Entwicklung im Bereich des Bauwesens folgendermaßen äußert: „Because structural analysis and detailing programs are complex, the profession as a whole will use programs written by a few. These few will come from the ranks of the structural „analyst“ ... and not from the structural „designers“. Generally speaking, their design and construction-site experience and background will tend to be limited. It is difficult to envision a mechanism for ensuring that the products of such a person will display the experience and intuition of a competent designer.“ (James G. MacGregor zitiert nach Petroski 1985, S. 201)

218 Böhme u. a. (1978).

219 Vgl. Seite 90 und folgende dieser Arbeit.

ein Eingriff in die „Finalisierung“ naturwissenschaftlicher Grundlagentheorie auf gesellschaftliche Zwecke hin vonnöten ist. Die Bestimmung von Objektklassen, für die dann funktionierende Anwendungstheorien entwickelt werden, hat für die Richtung der Technikentwicklung eine unverändert große Bedeutung, auch wenn numerische Algorithmen und spezialisierte Computersoftware zu einem unverzichtbaren Bestandteil solcher Vermittlungstheorien geworden sind. Vor allem in diesen Prozeß müssen Steuerungen der Richtung technischer Entwicklung nach wie vor eingreifen, um wirksam zu werden. Dies gilt in ähnlicher Weise auch für alle anderen Modellierungsverfahren. Zwar kann die Anwendung von Ansätzen wie der konnektionistischen und der Fuzzy-Modellierung nicht als Finalisierung verstanden werden, da dieser Ausdruck für die praktische Nutzbarmachung naturwissenschaftlicher Grundlagentheorie geprägt wurde. Hinsichtlich der sozial vermittelten Klassenbildung bei der technisch motivierten Anwendung der theoretischen Konzepte gilt jedoch Ähnliches. Stets muß hier ein erheblicher Aufwand getrieben werden, um für bestimmte Zwecke und Objekte funktionierende Kombinationen zwischen Konzeptualisierungen von Welt und ihrer Verarbeitung zu gewinnen. Dabei gehören bei jedem Verfahren andere Komponenten zu einer solchen Zurichtung eines Gegenstandsbereiches für verwertende Zugriffe.

Modellierung und die Organisation von Wissensanwendung

Für alle drei untersuchten Modellierungsansätze gilt, daß sich mit ihrer Anwendung etablierte Aufteilungen der Wissensverarbeitung an verschiedene Gruppen von Akteuren verändern. In manchen Fällen ist gerade diese Neuordnung von Kompetenzen verschiedener Akteursgruppen ein wesentliches Anliegen des Modellierungsvorhabens. So war es bei einigen der vorgestellten Modellierungs- und Simulationsprojekte ein explizit formuliertes Ziel, eine größere Unabhängigkeit von personengebundenem Wissen zu erreichen. Mit Hilfe der Modellierung sollten in vielen Fällen technischen Systeme so gestaltet werden, daß sie anstatt von menschlichen Akteuren mit programmierten Algorithmen gesteuert werden können. Zwar gelang es mit keinem der Verfahren, bestehendes Bediener-Wissen unverändert in den Computer zu übertragen. Es wurden aber erhebliche Umordnungen in den behandelten Prozessen vorgenommen, um diese auf eine weniger personengebundene Weise in den Griff zu bekommen. Nach der Abschöpfung ihres Wissens und der Implementation der darauf basierenden Automatisierung technischer Systeme werden die Wissensträger im Extremfall überflüssig. Auch für die Modellierung selbst wird häufig versucht, die Angewiesenheit auf „Expertenwissen“ möglichst gering zu halten. Nicht immer jedoch sind die Verschiebungen in den Wissensstrukturen der Technikentwicklung so eindeutig industriellen Interessensgegensätzen zuzuordnen. Dies zeigen Konflikte zwischen verschiedenen Gruppen von Wissensträgern und Akteuren, die in den jeweiligen Abschnitten aufgezeigt wurden.²²⁰ So geraten etwa bei der Einführung von FEM in die Betriebe Entwicklungs- und Konstruktionsabteilungen in einen Interessengegensatz. Bei der Fuzzy-Logik kommt es zu Konflikten zwischen Fuzzy-Linguisten und Fuzzy-Ingenieuren, während die klassischen Regelungstechniker beide Gruppen mit Mißtrauen betrachten. Auch bei der konnektionistischen Modellierung wurden Differenzen – etwa zwischen bedienerorientierten Praktikern und theorieorientierten Neuroinformatikern – aufgezeigt. Häufig konnte beobachtet werden, daß eine Tendenz

²²⁰ Vgl. Abschnitt 3.4.7 für FEM, 3.5.8 für Fuzzy und 3.6.5 für KNN.

von Seiten etablierter Technikentwickler besteht, neue Verfahren der Computersimulation mit Praxisferne und mangelnder Sicherheit in Verbindung zu bringen. So wurde für Fuzzy- und Neuro-Modelle das Fehlen des bewährten mathematischen Stabilitätsbeweises bemängelt, während bei der Methode der Finiten Elemente „erfahrene“ Praktiker vor einer leichtgläubigen Übernahme von „nur“ errechneten Ergebnissen warnten. Demgegenüber wurde ein stärker an dem Umgang mit dem Gegenstand selbst gebildetes Erfahrungswissen als Garant für eine solide Technikentwicklung eingeklagt.²²¹ Hier spielen verschiedene Konflikte wie etwa zwischen verschiedenen akademischen Fächern sowie zwischen universitärer und industrieller Forschung aber auch zwischen verschiedenen Generationen von Technikern, deren Verhältnis zum Computer als Hilfsmittel der Wissensgenerierung divergiert, eine Rolle. Diese Auseinandersetzungslinien können nur in empirischen Untersuchungen weiterverfolgt werden. Dabei kann jedoch das hier entwickelte Konzept von Modellierung in der Technikentwicklung als Knotenpunkt von Vermischungen zwischen heterogenen Elementen in soziotechnischen Strukturen ein fruchtbarer Ausgangspunkt sein.

3.7.3 Eigenschaften simulierter Artefakte

Neben der Auslotung von Eingriffsmöglichkeiten in simulationsbasierte technische Entwicklungen war es ein wesentliches Anliegen dieser Arbeit herauszufinden, ob Zusammenhänge zwischen der Modellierung von Weltausschnitten und den Eigenschaften der auf der Basis dieser Modelle entwickelten technischen Systeme festzustellen sind. Dabei galt das Interesse vor allem deren Einbindung in ihre physische und soziale Umwelt. So wurde etwa danach gefragt, welcher Aufwand für die Implementation und die Kontrolle der modellbasierten technischen Systeme getrieben werden muß und wie flexibel die entwickelten Artefakte gegenüber Umnutzungen und Umgebungsveränderungen sind. Zu diesen Punkten wurden in den einzelnen Kapiteln zahlreiche Ergebnisse erarbeitet.²²² Dabei lassen sich einige ansatzübergreifende Phänomene erkennen, die im folgenden zusammengefaßt werden sollen.

Laborausweitung

Das Zusammenwirken moderner technischer Artefakte mit ihrer physischen und sozialen Umgebung muß in vielerlei Form reguliert werden. Die meisten technischen Systeme werden durch aufwendige Maßnahmen wie etwa Stacheldrahtzäune, Abgasfilter oder Lärmschutzwände von ihrer Umgebung abgegrenzt. Häufig sichern komplizierte elektronische Steuerungsapparate den reibungslosen Verlauf der Vorgänge. Aber auch Verhaltensregeln für Nutzerinnen und Bediener sind im Umgang mit technischen Systemen in großer Zahl vonnöten und fungieren als Vermittler der Funktion technischer Systeme als materielle Komponenten eines gesellschaftlichen Dispositivs. Dabei kann der Grad der notwendigen Kontrolle für verschiedene technische Systeme und damit auch die Strukturierung der gesellschaftlichen Umwelt im Umgang mit diesen Systemen sehr unterschiedlich sein. Im Verlauf dieser Untersuchung hat es sich mehrfach gezeigt, daß bei simulationsbasierten Technikentwicklungen im Verlauf der Modellierung vorentschieden wird, in welchem Maße und auf welche Weise die Funktion der auf der Basis von Simulationen entwickelten technischen Systeme durch äußere Kontrollmaßnahmen gesichert werden muß. Dabei handelt es sich nur zu

²²¹ Vgl. z. B. Seite 68.

²²² Vgl. die Abschnitte 3.4.14 (FEM), 3.5.12 (Fuzzy) und 3.6.6 (KNN).

einem geringem Anteil um Kontrollmaßnahmen, die erst im Anschluß an den Entwicklungsprozeß an dem fertigen technischen System vorgenommen werden. Vielmehr wurde für jeden Modellierungsansatz beobachtet, daß die behandelten Prozesse schon während der Modellierung zusammen mit ihrer physischen und sozialen Umgebung umgeformt werden, um eine reibungslose Übereinstimmung zwischen modellierter und realer Umgebung zu erreichen.²²³ Dieser aktive Prozeß der „Realisierung“ der entwickelten Modelle wurde zu Beginn der Untersuchung in Abschnitt 1.4.1 in Anlehnung an Bruno Latours Charakterisierung der Implementierung wissenschaftlicher Ergebnisse in der Alltagswelt als „Ausweitung des Computer-Labors auf die Welt“ bezeichnet. In den folgenden Einzeluntersuchungen wurden dann charakteristische Zusammenhänge zwischen dem Transport der Welt in das Labor, der durch die Modellierung vollzogen wird, und der Laborausweitung, die bei der Installation der entwickelten technischen Systeme „in der Welt“ stattfindet, aufgezeigt. Dabei wurden innerhalb der einzelnen Ansätze sehr unterschiedliche Formen von Laborausweitung beobachtet. Für jeden Ansatz ließ sich feststellen, daß immer dann, wenn nur wenige Vernetzungen des formalisierten Weltausschnittes mit seiner Umgebung in das Modell eingearbeitet werden, ein hoher der Bedarf nach technischer Kontrolle des Zusammenwirkens zwischen dem entwickelten Artefakt und seiner Umgebung besteht. Alle Einflüsse, die bei der Modellierung vernachlässigt, nicht gemessen, nicht gefragt, als „Störgröße“ modelliert oder in die Umgebung ausgegrenzt wurden, müssen von dem fertigen technischen System ferngehalten werden, da dieses auf ihre Verarbeitung nicht eingestellt ist. Je weniger Aspekte in die Modellierung eingegangen sind, desto mehr muß das Funktionieren somit durch äußere Kontrollmaßnahmen abgesichert werden. Andererseits hat sich gezeigt, daß der Aufwand an zusätzlichen Maßnahmen zur Absicherung des reibungslosen Funktionierens simulierter Artefakte immer höher wird, je enger die in der Simulation verwendete Passung zwischen Welt und Modell ist.²²⁴ Sehr genaue Zieldefinitionen für die entwickelten Technologien benötigen detaillierte Modelle und ziehen damit einen hohen Aufwand an Kontrolle und Zurichtung nach sich. Dieser Zusammenhang läßt sich in ähnlicher Form bei allen Verfahren beobachten. So mußte ein Neuro-Modell umso aufwendiger mit zahlreichen Messungen begleitet werden, desto mehr System-Ausgangsgrößen es abbilden sollte. Bei der Fuzzy-Modellierung machte gerade die immer stärkere Ausweitung der zu modellierenden Wirklichkeitsausschnittes es unmöglich, noch sprachlich gefaßtes menschliches Wissen zur Modellierung zu verwenden. Die Nutzbarmachung besonders ausgefeilter FEM-Modelle mit vielen Modellgrößen verlangte nach einer sehr komplizierten Steuerungstechnik für die entwickelten Artefakte.

Diese Beobachtungen sind auf den ersten Blick widersprüchlich. Sowohl grobe und ungenaue als auch ausgefeilte und exakt angepaßte Modelle scheinen für die auf ihrer Basis entwickelte Technik umfangreiche Zurichtungsmaßnahmen zu erzwingen. Bei näherer Betrachtung wird jedoch deutlich, daß hier zwischen zwei verschiedenen Weisen der „Modellverfeinerung“ unterschieden werden muß. Eine Erhöhung der in dem Modell enthaltenen Aspekte ist nicht auf beliebige Weise zu erreichen. So wurde etwa für das konnektionistische Modell festgestellt, daß eine komplexere Modellstruktur keinesfalls eine bessere Erfassung relevanter Phänomene garantiert. Dagegen

223 Vgl. Seite 124 (Fuzzy), Seite 95 (FEM) und Seite 166 (KNN).

224 Vgl. z. B. für die FEM den Abschnitt „Flexibilität und Kontrolle“ auf Seite 95.

wurde gezeigt, daß immer dann besonders viele Kontrollmaßnahmen für ein auf „Neuro-Modellen“ beruhendes technisches System installiert werden mußten, wenn wenig lokales Wissen bei der Auswahl der „Trainingsdaten“ einbezogen wurde. Bei der FEM-Modellierung wurde deutlich, daß nicht eine immer weitere Verfeinerung der zugrundeliegenden Differentialgleichungen wohl aber eine stärkere Vernetzung mit empirischen Wissensanteilen „näher zur Realität“ hinführt.²²⁵ Auf der Basis dieser Unterscheidung lassen sich diese scheinbar widersprüchlichen Beobachtungen meines Erachtens in einer These zusammenführen, die für alle drei Modellierungsverfahren Gültigkeit hat:

Je weniger ein Modell in einem Wissen verankert ist, das am Ort und am konkreten Gegenstand gewonnen wurde, desto mehr muß die auf seiner Basis entwickelte Technologie durch Umformungen und Zurichtungen ihrer Umgebung stabilisiert werden. Dies gilt unabhängig davon, ob dieses Wissen in der Form von naturwissenschaftlich verankerten Differentialgleichungen, von Wenn-Dann Regeln oder von Datensätzen gefaßt ist. Um solches lokal verankertes Wissen zu gewinnen, muß die Modelliererin sich in die Strukturen hineinbewegen, an denen das Wissen vorliegt. Es muß mit großer Sorgfalt und einem gewissen Aufwand gesammelt werden. Unter dieser Voraussetzung bietet jeder der drei Modellierungsansätze Möglichkeiten, lokales Wissen aufzunehmen und zu integrieren. Da ein solches Wissen jedoch immer an Personen, Zeiten und Lokalitäten gebunden ist, kann es nur für kleine Bereiche Gültigkeit beanspruchen. Je höher der Anspruch an die Reichweite eines Modells ist, desto mehr müssen Universalisierungsmaßnahmen getroffen werden, deren Gültigkeit durch erhöhte Kontrollmaßnahmen garantiert werden muß. Modelle, die in diesem Sinne differenziert und in lokalen Strukturen verwurzelt sind, lassen sich daher – so die These – nur für kleine Bereiche von Welt erstellen. Eine Ausweitung des Modellbereichs muß entweder durch erhöhte Zurichtungs- und Kontrollmaßnahmen oder durch einen Verlust an Differenziertheit erkaufte werden. Wird der Aufwand für die Einarbeitung des lokalen Wissens gescheut, so sind auch für kleine Bereiche stabilisierungsbedürftige Technologien das Ergebnis.

Dies bedeutet allerdings meines Erachtens nicht notwendig, daß technische Systeme, die nicht auf die beschriebene Weise in lokale Kontexte eingebunden sind, funktionsunfähig oder auch nur störungsanfälliger als andere Technologien sind.²²⁶ Viele wirkungsmächtige technische Systeme wurden auf der Basis weitreichender und detaillierter Computersimulationen entwickelt und funktionieren durchaus zuverlässig. Im Verbund mit dem Computer als Plattform und mit effektiver Software „Unterstützung“ können die Simulationstechniken sehr wohl als ein wirkungsmächtiges Werkzeug für eine „stabil-mobile“ Technikentwicklung eingesetzt werden. Aus den durchgeführten Untersuchungen läßt sich meines Erachtens jedoch ableiten, daß dieses Funktionieren durch einen erheblichen Einsatz sozialer und materieller Ressour-

225 Vgl. Seite 91 und folgende.

226 In diese Richtung zielen einige Analysen der Gründe für das Versagen technischer Systeme, wie etwa Petroski (1985) und Ferguson (1993). So führt etwa Ferguson (S. 171 ff.) zahlreiche Fälle auf, in denen komplexe technische Systeme versagten und führt dieses darauf zurück, daß bei der Entwicklung zu wenig lokales Erfahrungswissen eingeflossen ist. Diese Analyse halte ich zwar für richtig, den Zusammenhang aber nicht für zwingend. Auch die von Ferguson kritisierten „von oben“ entwickelten Technologien können m.E. mit einem genügend hohen Aufwand an flankierenden Maßnahmen zum Funktionieren gebracht werden. Die Frage ist nur, welcher Preis dafür gezahlt werden muß.

cen und durch rigide Disziplinierung der soziotechnischen Umwelt dieser Systeme aufrecht erhalten werden muß. Je höher der durch Ausweitungen des „Computerlabors“ erzielte Gewinn an „StabilMobilität“ ist, desto mehr muß meines Erachtens die Umgebung nach dem Bild des Computerlabors umgeformt werden, um die Einhaltung des Modells zu garantieren. Modellierungen, die im Rahmen industrieller Technikentwicklung durchgeführt werden, zielen, wie gezeigt wurde, in der Regel in erster Linie auf Mobilisierung und Beschleunigung mit hohen Reichweiten und zudem auf möglichst große Unabhängigkeit von personengebundenem Wissen. Dementsprechend „unterstützt“ auch die gängige Simulationssoftware zwar die effektive Modellierung, aber kaum die gründliche Kontextualisierung der zu erstellenden formalen Strukturen. Aus diesem Grund ist es zu erwarten, daß simulationsbasierte Technologien technologische Rekonstruktionen weiter Teile von Welt mit einer hohen sozialen und technischen Stabilisierungsbedürftigkeit mit sich bringen werden. Dies ist jedoch keinem der hier vorgestellten Ansätze inhärent, sondern eine Folge der Eingebundenheit von Technikentwicklung in die bestehenden ökonomischen und gesellschaftlichen Strukturen.

Gültigkeitsbedingungen – Sicherheit und Flexibilität

Die Frage danach, ob und wie angegeben werden kann, was die Bedingungen der Gültigkeit von Modellen sind, die technischen Entwicklungen zugrunde liegen, ist in mehrerer Hinsicht für die Einbindung technischer Systeme in soziale Strukturen von Bedeutung. Zunächst bestimmt das Wissen um die Grenzen der Gültigkeit der Modelle die Sicherheit, mit der modellbasierte technische Artefakte betrieben werden können. Dies gilt vor allem dann, wenn die Steuerung technischer Systeme auf der Basis der Modellierung automatisiert werden soll, wie es häufig der Fall ist. Nur wenn bekannt ist, in welchen Fällen die der Konstruktion und Regelung zugrundeliegenden Modelle nicht mehr in ausreichendem Maße die modellierten Weltausschnitte repräsentieren, können auch die Grenzen des sicheren Einsatzes der entsprechenden Systeme eingehalten werden. Des weiteren hängt aber auch die Flexibilität der entwickelten Artefakte gegenüber verschiedenen Nutzungen und Veränderungen in der Umgebung von dem Wissen um die Gültigkeitsbedingungen der bei der Technikentwicklung verwendeten Modelle ab. Systeme, für die nicht bekannt ist, was die Bedingungen für ihr Funktionieren sind, werden schwieriger anderweitig eingesetzt werden können, als solche, bei denen leicht überprüft werden kann, ob alle nötigen Voraussetzungen noch gegeben sind. In der Untersuchung der einzelnen Modellierungsansätze wurden einige Ergebnisse zu dem Zusammenhang zwischen Modellierungsansatz und dem Wissen um die Gültigkeitsbedingungen von Modellen erarbeitet. Zunächst konnte in dieser Hinsicht ein prinzipieller Unterschied zwischen verhaltensnachahmender Modellierung und analytisch basierter Beschreibung der inneren Wirkungsstrukturen eines Systems konstatiert werden. Bei dem erstgenannten Vorgehen sind keine expliziten Annahmen über die in dem modellierten System wirkenden Gesetzmäßigkeiten enthalten. Damit ist es auch nicht ausdrücklich anzugeben, unter welchen Bedingungen die resultierenden Black-Box Modelle Gültigkeit haben. Bei technischen Systemen, die auf der Basis einer konnektionistischen Modellierung betrieben werden, bestehen daher erhebliche Schwierigkeiten, die Betriebssicherheit außerhalb des im „Training“ verarbeiteten Bereiches zu gewährleisten.²²⁷ Wann die-

227 Vgl. Seite 164.

ser Bereich verlassen wird, kann zudem nicht ohne weiteres angegeben werden. Bei der Fuzzy-Modellierung kann mit dem verarbeiteten expliziten Regelwissen auch ein Wissen um dessen Gültigkeitsbedingungen verknüpft sein. Für Verfahren der automatisierten Fuzzy-Regelfindung dagegen gilt in dieser Hinsicht Gleiches wie für die „Neuro-Modelle“.²²⁸ Bei analytisch basierten White-Box Modellen, wie sie in der Methode der Finiten Elemente verwendet werden, ergeben sich dagegen aus den naturwissenschaftlich basierten Gleichungen Hinweise auf die Gültigkeitsbedingungen des Modells. Hier ist es offensichtlich, daß das Modell seine Gültigkeit verliert, wenn die explizit getroffenen Annahmen über die Umgebungsbedingungen wie etwa konstanter Druck oder eine bestimmte Temperatur nicht mehr gegeben sind. Zudem sind die Voraussetzungen der Anwendbarkeit naturwissenschaftlicher Grundlagentheorie auf praktisch relevante Fälle in der Regel Bestandteil dieser Theorien. Auch die empirischen Modellanteile, die in allen praxisrelevanten analytischen Modellen enthalten sind, bringen ihren Gültigkeitsbereich mit in das Modell. Dieser ist häufig an recht enge Grenzen von Messungen und Erfahrungen geknüpft. Diese Grenzen können jedoch in der Regel explizit angegeben werden.²²⁹

Die geschilderten Unterschiede zwischen den Modellierungsansätzen scheinen zunächst erheblich zu sein. Bei näherer Betrachtung der Untersuchungsergebnisse weichen sich die krassen Gegensätze jedoch auf. Denn unabhängig von dem Modellierungsansatz können Bedingungen dafür ausgemacht werden, daß im Verlauf einer Modellierung auch die Voraussetzungen ihrer Anwendbarkeit in den Blick kommen. Dabei läßt sich eine deutliche Parallele zu den oben geschilderten Bedingungen für eine umformungsarme Technikentwicklung ziehen. So hat es sich meines Erachtens ansatzübergreifend gezeigt, daß ein Wissen um die Grenzen der Gültigkeit der entwickelten Modelle nur gewonnen werden kann, wenn eine sehr enge Vernetzung mit ortsgebundenem, gegenstandsbezogenem Wissen angestrebt wird. Dies ergibt sich bei Black-Box Modellierungen schon aus den oben geschilderten prinzipiellen Problemen. So ist bei der konnektionistischen Modellierung die Zusammenarbeit mit erfahrenem Bedienpersonal die einzige Möglichkeit, die relevanten Datensätze zu finden und einen sicheren Betrieb der Neuro-Technik zu gewährleisten. Nur durch sorgfältiges und gründliches Befragen kann eine teilweise Erfassung menschlichen Wissens in Fuzzy-Formalismen oder Neuro-Daten erreicht werden. Auch die Flexibilität gegenüber wechselnden Einsatzbedingungen erreicht ein Neuro-Modell nicht etwa primär durch seine „Lernfähigkeit“ sondern durch eine bewußt gegenüber lokalen Einflüssen möglichst lange offen gehaltene Modellierungsweise.²³⁰ Die Fuzzy-Modellierung ermöglicht nur dann die propagierte Entwicklung technischer Artefakte, die sich flexibel an individuelle Bedürfnisse anpassen lassen, wenn den „Individuen“ auch tatsächlich die Möglichkeit eingeräumt wird, ihr Wissen in die Gerätesteuerung einzubringen. Während die Problematik der Gültigkeitsbedingungen bei diesen Ver-

228 Vgl. Seite 130.

229 Auf die Tatsache, daß diese Zusammenhänge zwar prinzipiell bekannt sein können, in der Praxis aber dennoch übersehen werden, ist immer wieder hingewiesen worden. So führt z. B. Petroski (1985, S. 159 ff.) den Einsturz neuer Typen von Brücken darauf zurück, daß bewährte Berechnungsverfahren auf Konstruktionen mit neuen Größenordnungen übertragen werden, für die wesentliche Voraussetzungen nicht mehr gegeben sind. Diese „Versäumnisse“ erklärt er aus der Vernachlässigung gezielter Weitergabe technischen Wissens an nachfolgende Generationen von Technikentwicklern.

230 Vgl. Seite 164.

fahren häufig auch für die Modellierer selbst im Vordergrund steht, ist es bei einer analytischen Modellierung weniger leicht zu erkennen, daß das Bewußtsein um die Grenzen des Modells nicht automatisch vorhanden ist, sondern aktiv geschaffen werden muß. Die Untersuchung hat jedoch ergeben, daß dies durchaus der Fall ist. Wie in Abschnitt 1.4.3 ausgeführt wurde, hat die Finalisierungstheorie gezeigt, daß die Entwicklung stabiler Kombinationen zwischen Theoriesätzen und Objektgruppen, auf die sich diese anwenden lassen, ein langwieriger Prozeß ist, der sich nicht durch abstrakte Ableitung aus der Fundamentaltheorie abkürzen läßt. Wenn analytische Modelle auf unbekanntes Gebiet ausgedehnt werden sollen, ist es daher zunächst immer unsicher, welche Annahmen ihre Gültigkeit behalten. Auch bei der Anwendung von Computersimulation kann, wie hier im Zusammenhang mit der FEM gezeigt wurde, auf diesen Prozeß nicht verzichtet werden.²³¹ Die Herleitung funktionierender Simulationen für eine bestimmte Klasse von Objekten erfordert den gezielten Einsatz sozialer und materieller Ressourcen. Gerade die Bedingungen der Gültigkeit getroffener Annahmen sind dabei ein Wissen, das häufig an die Personen gebunden ist, die in diesem Prozeß aktiv beteiligt sind, und das wegen seiner vermeintlichen Selbstverständlichkeit nicht expliziert wird. Es muß daher willentlich eine Anstrengung unternommen werden, um dieses Wissen zu gewinnen und es vor allem auch über die ständigen Weiterentwicklungen und Umnutzungen einmal gewonnener Formalisierungen mitzuführen. Auch hier gilt jedoch die oben gemachte Einschränkung: Diese Art von Wissen ist nicht beliebig universalisierbar und formalisierbar. Es gilt immer nur für kleine Bereiche und kurze Zeiten und muß daher immer wieder neu mit involvierten Personen und an konkreten Gegenständen gewonnen werden.

Es hat sich somit gezeigt, daß die eingangs aufgestellte These, nach der die Qualität des Wissens über Gültigkeitsbedingungen von Modellen und damit die Sicherheit und Flexibilität modellbasierter technischer Systeme durch den Modellierungsansatz determiniert ist, modifiziert werden muß. Zwar ist es offensichtlich, daß bei simulationsbasierten Technikentwicklungen ein wesentlicher Anteil des Wissens in das Modell eingeht und in seinem Format durch den Modellierungsansatz strukturiert wird. Daher hängt von der Gestalt dieser formalen Struktur mehr ab, als bei klassischen Verfahren, die an der Tradition einzelner Firmen oder der Erfahrung einzelner Akteure orientiert sind. Somit hat sich die These bestätigt, daß in der Modellierung wesentlich mitbestimmt wird, ob und wie für die fertigen Artefakte Bedingungen der Gültigkeit angegeben werden können. Daraus folgt meines Erachtens, daß der für die Technikentwicklung schon immer vorhandene enge Zusammenhang zwischen der Kenntnis der Gültigkeitsbedingungen von Wissensbeständen und den Möglichkeiten der Einsetzbarkeit technischer Artefakte, für simulationsbasierte technische Systeme insgesamt eine neue Qualität gewinnt. Wie sich dieser Zusammenhang jedoch für eine Technikentwicklung ausformt, ist nicht von dem Formalisierungsverfahren abhängig. Wenn Computersimulation für eine Technikentwicklung eingesetzt wird, kann – unabhängig vom Modellierungsansatz – nur durch eine ständige Rückkopplung der Modelle an die konkreten Gegebenheiten Betriebssicherheit und Flexibilität erzielt werden. Beispiele für solche lokal vernetzten Modellierungen, auf deren Basis sinnvoll eingepaßte technische Systeme entwickelt wurden, fanden sich für jedes der drei Verfahren. Da eine entsprechend intensive Verbindung zwischen formaler und kon-

231 Vgl. Seite 90 und folgende.

kreter Struktur immer nur für kleine Bereiche möglich ist, können diese Modelle keine beliebig große Reichweite erlangen. Auch die Flexibilität kann niemals so weit erhöht werden, daß eine sorgfältige Prüfung der neuen Einsatzbedingungen nicht mehr nötig ist. Sollen die entwickelten Technologien auf andere Weise oder in einer anderen Umgebung genutzt werden, ist eine gezielte Anpassung der Modelle jedoch dann möglich, wenn bewußt ein großer Wert auf die Herausarbeitung der Gültigkeitsbedingungen gelegt wurde. Bei jeder modellbasierten Technikentwicklung, für die der arbeitsintensive Prozeß der Wissensintegration zugunsten schneller und scheinbar universeller Formalisierung umgangen wurde, ist dagegen zu befürchten, daß schon kleine Schwankungen in den Betriebsbedingungen oder Umnutzungen der Artefakte zu unerwarteten Ergebnissen führen. Versuche dazu, Technikentwicklungen auf diese unverankerte Weise mit der Hilfe von Computersimulation zu beschleunigen, wurden für alle drei Verfahren beobachtet. Förderlich für eine solche Entwicklung ist es dabei offenbar, daß das Computerlabor Maßstabsverschiebungen erlaubt, die in der Komplexität der Realität zum Scheitern verurteilt sind und so den Anschein erweckt, es sei mit seiner Hilfe möglich, die beschriebenen engen Grenzen „angepaßter Technikentwicklung“ zu überschreiten.²³² Wenn auf der Basis solcher unverankerten Modellaussagen Entscheidungen getroffen werden, können auch die oben beschriebenen Stabilisierungsmaßnahmen nicht mehr verhindern, daß das Modell von der Realität überholt wird und die entwickelte Technik zusammenbricht.

Kontrollierbarkeit

Ein entscheidender Faktor für die Möglichkeiten der Einbindung technischer Systeme in demokratische Strukturen ist es, wie differenziert die Möglichkeiten sind, das Verhalten technischer Artefakte von außen zu beeinflussen. Während oben schon die Eingriffsmöglichkeiten in die Modellierung selbst erörtert wurden, soll es hier darum gehen, wie sich Modellierung und Simulation auf die Steuerbarkeit der mit ihrer Hilfe entwickelten technischen Artefakte auswirken:

Unabhängig vom Ansatz gilt, daß im Betrieb eines simulationsbasierten Artefaktes, nur diejenigen Größen gezielt beeinflußt werden können, die in das Modell eingegangen sind. Dabei ist es unwesentlich, ob die Auswahl über Eingangsgrößenfestlegung (KNN, Fuzzy) oder explizite Aspektbestimmung (FEM) stattgefunden hat. In jedem Fall kann auf Größen, die in der Modellierung nicht eingearbeitet wurden, auch nicht steuernd zugegriffen werden. Die Möglichkeiten der Umgebung, das Verhalten simulationsbasierter technischer Systeme zu beeinflussen sind damit umso vielfältiger, je differenzierter die Modelle sind, die einer Computersimulation zugrunde lagen. Die Bedingungen, für eine solche Differenziertheit sind oben ausgeführt worden. Sie läßt sich nur unter Heranziehung möglichst vieler lokaler Wissensanteile und auch dann nur für begrenzte Bereiche gewinnen. Zwar bieten gerade komplexe technische Systeme mit ihren aufwendigen Regelungskonzepten eine Fülle von verschiedenen Möglichkeiten der Steuerung. Diese sind jedoch im Prozeß der Modellierung gemein-

²³² Diesen Zusammenhang beschreibt auch Petroski (1985, S.200/201) für den Computereinsatz im Bauwesen: „And as more complex structures are designed *because* it is believed that the computer can do what man cannot, then there is indeed an increased likelihood that structures will fail, for the further we stray from experience the less likely we are to think of all the right questions“. Dabei ist es nicht das geringste Problem, daß für jede Modellierung vollkommen unabhängig von ihrer Verankerung in der Realität gleichermaßen perfekte Bilder produziert werden können. Vgl. dazu Kapitel 4 dieser Arbeit.

sam mit der Gestalt des Artefaktes eng auf einen sehr speziellen Anwendungszweck zugeschnitten worden. Eine besonders enge Kopplung von Zweck und Gestalt eines technischen Systems besteht, wenn auf der Grundlage der Modelle Optimierungen der technischen Systeme stattgefunden haben. In einem solchen Fall werden im Zuge der Modellierung von außen Optimierungskriterien vorgegeben, die den Verlauf der Technikentwicklung entscheidend beeinflussen und später nur einen engen Spielraum für verschiedene Steuerungsweisen zulassen.²³³ Innerhalb dieser sehr genau vorgegebenen „optimalen“ Einsatzweise sind die Möglichkeiten der zielgenauen Beeinflussung der technischen Systeme allerdings ungeheuer groß. Für alle drei Modellierungsverfahren ließ es sich beobachten, daß Modellierung und Computersimulation vor allem auf diese Weise als Mittel eingesetzt werden, um die Möglichkeiten von Zugriffen und Kontrolle zu steigern. Eine Vielfalt möglicher verschiedener Verwendungsweisen wird, wie hier ausgeführt wurde, dadurch nicht notwendig befördert. Zusätzlich verhindern die oben beschriebenen aufwendigen Zurichtungsmaßnahmen zur Stabilisierung solcherhochoptimierten Systeme die Anwendung von Steuerungskonzepten mit anderen Zielen als den schon in der Modellierung vorgegebenen. Werden allerdings die Bedingungen eingehalten, die in den vorangegangenen Abschnitten für eine möglichst wenig umformungsintensive, betriebssichere und flexible Technikentwicklung genannt wurden, so kann die modellbasierte Simulation durchaus dazu beitragen, technische Systeme zu entwickeln, die zielgenau und bedarfsorientiert gesteuert werden können. Damit diese Möglichkeiten den Interessen möglichst vieler Akteursgruppen, seien es Techniknutzer, Bedienerinnen oder auch von dem Betrieb des Systems betroffene Personengruppen, wie etwa Anwohnerinitiativen gerecht werden, müssen deren Anliegen von Beginn an in die Modellierung eingehen. Eine nachträgliche Einwirkung auf die Betriebsweise simulationsbasierter technischer Systeme ist dagegen oft sehr schwierig. Wie es in Abschnitt 3.7.2 beschrieben wurde, gibt der Formalisierungs-Ansatz vor, in welcher Form eine solche Beteiligung möglich ist, was durchaus einen Einfluß auf die Möglichkeiten einzelner Akteursgruppen hat, sich an dem Prozeß der Modellierung zu beteiligen.

²³³ Vgl. S. 108 (KNN) und S. 39 (Fuzzy).

4 Das Simulationsbild als Weltbild

4.1 Warum eine Visualisierung mehr als tausend Zahlen sagt

Bildliche Darstellungen sind ein allgegenwärtiger Bestandteil jeder Computersimulation. Angefangen von den graphischen Symbolen und Piktogrammen, die auf den Bedieneroberflächen kommerzieller Simulationssoftware die Modellierung unterstützen, bis hin zu täuschend echten Animationen, die Simulationsergebnisse anschaulich an die Öffentlichkeit tragen, sind es immer wieder computergenerierte Bilder, die simuliertes Wissen transportieren. Von den vielen möglichen Funktionen, die bildliche Repräsentationen innerhalb ingenieurwissenschaftlicher Computersimulation einnehmen, soll hier mit den Visualisierungen der Ergebnisse „numerischer Experimente“ die wohl prominenteste Gruppe von Simulationsbildern untersucht werden.

Diese Visualisierungen setzen, indem sie am Ende eines Modellierungsprozesses, wie er hier etwa für die Methode der finiten Elemente beschrieben wurde, erzeugt werden, auf sämtlichen im Verlauf der Modellierung vorgenommenen Transformationen auf. Die Bearbeitung von Bildern ist daher nur ein Schritt des Simulationsverfahrens, in dessen Verlauf Ausschnitte von Welt technologisch ver- und bearbeitet werden. Dieses Verfahren beginnt, wie es in Kapitel 3 dieser Arbeit beschrieben wurde, wenn der zu untersuchende Gegenstand zum Zwecke der Modellierung aus seiner Umgebung herausgetrennt wird. Es setzt sich mit der Benennung und Quantifizierung der Systemgrößen fort und führt über die Auswertung der Simulationsergebnisse bis hin zu den Entscheidungen über die Auslegung von technischen Artefakten. Dieser Vorgang, der hier als eine Rekonfiguration soziotechnischer Strukturen beschrieben wurde, wird bei der Entwicklung von Technik nicht geradlinig, sondern zyklisch durchlaufen. Die visuelle Aufbereitung von Daten ist dabei nur ein Glied in einer Kette von Transformationen. Mit der Verbreitung von computergestützter Simulation hat jedoch die Bildproduktion innerhalb dieses Zyklus in neuer Weise und in neuem Umfang Bedeutung erhalten. Daher lohnt es sich meines Erachtens, gerade diesem Übersetzungsschritt eine besondere Aufmerksamkeit zuzuwenden.

Eine Simulationsvisualisierung entsteht, wie im Folgenden dargelegt wird, indem mit der Hilfe verschiedener Techniken die in einem „numerischen Experiment“¹ produzierten Zahlenmengen in anschauliche bildliche Darstellungen übersetzt werden. Dabei leisten solche Bilder mehr als nur die durch die Bezeichnung „Visualisierung“ suggerierte Veranschaulichung von Rechenergebnissen. Zwar sind die bildlichen Repräsentationen mit den Zahlenmengen, aus deren Übersetzung sie entstanden, logisch äquivalent. In praktischer Hinsicht jedoch unterscheiden sich die Repräsentationsformen. Der Unterschied zwischen beiden besteht nicht etwa nur darin, daß die bildliche Darstellung den gleichen Sachverhalt auf eine Weise beschreibt, die dem menschlichen Verständnis näher liegt. Die kulturelle und soziale Prägung menschlicher Wahrnehmung führt zwangsläufig dazu, daß bei der Übersetzung von Zahlen in Bilder zusätzliche Bedeutungen aufgenommen werden. Sowohl bei der Bildproduktion als auch bei der Bildinterpretation wird auf Seh- und Denkgewohnheiten, wie etwa Konzeptionen von Raum und Zeit oder Assoziationen zwischen Farben und Objekteigenschaften, zurückgegriffen, die für eine historisch konkrete Gesellschaftsformation typisch sind. Ebenso wie schon die ihnen zugrundeliegenden formalen Modelle von Welt können die Simulationsvisualisierungen daher als soziotechnische Konstrukte verstanden werden. Diese Sichtweise auf Simulationsvisualisierung als

1 Für eine Erklärung und Diskussion dieses Begriffes vgl. Abschnitt 3.4.15.

Interpretation statt als Veranschaulichung von Welt ist hier gemeint, wenn davon gesprochen wird, daß Simulationsbilder ein „Weltbild“ transportieren.

Der Mehrwert an Bedeutung, den die Visualisierungen im Verlauf ihrer Produktion aufnehmen, kann gezielt eingesetzt werden, um mit dem Bild bestimmte Aussagen zu vermitteln oder spezielle Verwertungen zu ermöglichen. In diesem Fall variiert er von Bild zu Bild. Darüber hinaus transportiert jedoch jedes Simulationsbild Bedeutungen, die nicht durch einen bewußten Einsatz visueller Mittel zur Verdeutlichung bestimmter Inhalte zustande kommen, sondern jedem einzelnen Bild dieser Art durch das Produktionsverfahren zugeeignet werden. So ist es offensichtlich, daß ein Computerbild eine andere Wirkung entfaltet als beispielsweise ein Aquarell, auch wenn beide aus der gleichen Zahlenmenge nach der gleichen Übersetzungsregel erzeugt wurden und daher den gleichen „Sachverhalt“ abbilden. Wird also – wie es bei einem Simulationsbild der Fall ist – ein Ausschnitt von Welt durch ein Computerbild repräsentiert, werden dadurch automatisch die mit einem Computerbild verbundenen Assoziationen mit der Sichtweise auf diesen Weltausschnitt verknüpft. In dieser Untersuchung soll auf beide Aspekt der Weltbildvisualisierung eingegangen werden.

Ein Zusammenhang zwischen sozialem und kulturellem Kontext und der Bildauswertung läßt sich aber auch in umgekehrter Richtung herstellen. Denn Bilder greifen nicht nur in der beschriebenen Weise kulturell codierte Bedeutungen auf. Mit der ihnen eigenen visuellen Rhetorik prägen sie auch ein bestimmtes Verständnis von Welt und deren Funktionieren und tragen damit zu der Verwirklichung des visualisierten Weltbildes bei. Welcher Art das simulierte Weltbild ist, kann weder allein als Entscheidung einzelner Akteure noch als Ergebnis eines zufälligen Zusammenspiels technischer, sozialer und kultureller Faktoren angesehen werden. Vielmehr kann davon ausgegangen werden, daß in der Regel gerade solche Weltbilder produziert werden, die mit einem schon bestehenden Dispositiv von Weltinterpretation kongruent sind. Um diesen Prozeß gegenseitiger Angleichung verstehen zu können, sollen die Sprechweisen von Simulationsbildern hier genauer untersucht werden. Indem der Prozeß, durch den sie erzeugt und ausgewertet werden, sorgfältig analysiert wird, kann deutlich werden, an welchen Stellen gesellschaftliche Konventionen in die Bildproduktion einfließen und welche Sichtweisen und Wissensformen dadurch bestärkt oder geschwächt werden.

Zu diesem Zweck soll das Simulationsbild hier einer ausführlichen Bildkritik unterzogen werden.² Dazu werden zunächst die Verfahren geschildert, mit denen bei der Simulationsvisualisierung Zahlenkolonnen in Bilder transformiert werden, und die wesentlichen Elemente der dabei produzierten Bilder aufgeführt. Auf der Basis dieser Ergebnisse wird versucht, die Simulationsvisualisierung als eine eigene Bildgattung

2 Hier kann an verschiedene Ansätze angeschlossen werden, in denen gefordert wird, das Instrumentarium der Kunstwissenschaften zur Analyse anderer als künstlerischer Bilder einzusetzen. So fordert etwa Bredekamp (1997) eine „Überwindung des Anikonismus“ und eine Schulung des kritischen Sehvermögens auch gegenüber Bildern aus Naturwissenschaft und Technik. In ähnliche Richtung zielen Heintz/ Huber (2001, S. 10): „Ähnlich wie man wissenschaftliche Texte mit dem Werkzeug der Literaturtheorie analysieren kann, bietet es sich an, wissenschaftliche Bilder mit dem Instrumentarium der Kunstwissenschaft auf ihre Funktion und formale Qualität hin zu untersuchen, gerade auch im Vergleich und im Unterschied zum künstlerischen Bild.“. Für das Simulationsbild liegt eine solche Analyse allein schon deshalb nahe, weil die Übergänge zum künstlerischen Bild häufig fließend sind. So gibt es einige Fälle, in denen Simulationsbilder, die in einem „wissenschaftlichen“ Kontext entstanden sind, als Kunstwerke präsentiert werden und andere, in denen an der Gestaltung von Simulationsvisualisierungen KünstlerInnen beteiligt sind.

mit einer spezifischen visuellen Rhetorik zu konzeptualisieren. Dann werden konkrete Mobilisierungen verschiedener Ressourcen, die durch diese Art technikwissenschaftlicher Bildproduktion möglich werden, aufgezeigt. Anschließend werden einige Aspekte der Rezeption von Computervisualisierung durch Akteure innerhalb und außerhalb der Technikentwicklung diskutiert. Abschließend wird versucht, die Simulationsvisualisierung in einen breiteren Zusammenhang technisch-wissenschaftlicher Bildproduktion einzureihen. Dabei wird einerseits ein Vergleich mit Bildern, die von Beobachtungsinstrumenten wie dem Mikroskop geliefert werden, angestellt und andererseits eine Interpretation als wissenschaftliche Illustration vorgenommen.

4.2 Die Bildproduktion - Malen nach Zahlen

4.2.1 Ausgangspunkt Simulationsexperiment und Zahlenhaufen

Innerhalb eines „Simulationsexperimentes“³ wird ein mathematisches Modell des zu untersuchenden Systems unter bestimmten Bedingungen ausgewertet. Während bei der Modellbildung durch Abstraktion aus einer diffusen Umgebung ein mathematisches Modell gewonnen wird, das die interessierenden statischen und dynamischen Eigenschaften des Systems enthält, wird bei einem einzelnen Simulationslauf, der auf der Basis dieses Modells durchgeführt wird, ein konkretes Verhalten des Systems unter festgelegten Rand- und Eingangsbedingungen mit Hilfe numerischer Verfahren durch einen Computer berechnet. Auf diese Weise werden Fragen der Art „*Was passiert mit dem System, wenn...?*“ beantwortet. Aus dem Modell werden damit Repräsentationen des Systems gewonnen, die mit empirisch gewonnenen Daten abgeglichen werden können. Mit einem einzigen Modell können beliebig viele Simulationsrechnungen durchgeführt werden.

Nach einem Berechnungsgang liegt als Ergebnis zunächst nur eine große Menge von Zahlenwerten vor. Jede dieser Zahlen ist ein Rechenergebnis an einem diskreten Punkt in Raum und Zeit und kennzeichnet damit den Wert, den die betreffende Ausgangsgröße der Simulation an diesem Punkt nach Auskunft der Berechnung annimmt. Die Zahlen stehen damit für die Werte der physikalischen Größen wie Temperaturen oder Drücke, nach denen in der Berechnung „gefragt“ wurde. Die auf diese Weise produzierten riesigen Datenmengen entziehen sich jeder direkten Auswertung. Sie müssen der Interpretation erst durch eine „Visualisierung“ zugänglich gemacht werden. Mittels ausgefeilter computergestützter Visualisierungstechniken werden aus den Zahlenmengen Bilder produziert, die sogar für „Laien“ verständliche Aussagen enthalten können. Zwischen Berechnung und Interpretation tritt unumgänglich das Bild als Mittler. Die Visualisierung ist daher keinesfalls nur ein Hilfsmittel bei der Präsentation der Simulationsergebnisse nach außen, sondern stellt für die Simulationsanwender selbst ein unerlässliches Werkzeug zu deren Interpretation dar.⁴

4.2.2 Die Übersetzungstechniken

Wie alle Computergraphiken sind die Bilder, die in ingenieurwissenschaftlichen Simulationsanwendungen erzeugt und verwertet werden, Produkte eines Transformationsprozesses. Eine Menge von Daten wird nach bestimmten Übersetzungsregeln der

3 Für eine Erklärung und Diskussion dieser gängigen Bezeichnung vgl. Abschnitt 3.4.15 dieser Arbeit.

4 So konstatieren z. B. Kaufmann/Smarr (1994, S. 15): „Es ist offensichtlich, daß Verfahren zur bildlichen Aufbereitung von Simulationsergebnissen für die Forscher ebenso wichtig sind, wie die Supercomputer selbst.“.

Oberfläche eines Computerbildschirmes zugeordnet. Auf diese Weise werden Verläufe abstrakter Zahlenwerte in eine Bildsprache übersetzt. Dabei können aus dem Ergebnis einer einzigen Simulationsrechnung viele verschiedene Bilder, etwa mit unterschiedlichen Ausschnitten, Ansichten oder Maßstäben, erzeugt werden. Auch die Art und Anzahl der dargestellten Größen kann variieren. Sind diese Parameter ausgewählt, so hängt es noch von dem Kanon der Übersetzungsregeln zwischen Zahlen und Bildgestaltung – der Codierungstechnik – ab, wie das Bild aussieht und in welcher Hinsicht es interpretiert werden kann. Die genannten Visualisierungen, werden im Anschluß an die Simulationsrechnung von eigens zu diesem Zweck entwickelten Algorithmen generiert. Der „Postprozessor“, in dem diese Algorithmen und damit die Übersetzungsregeln enthalten sind, ist in der Regel ein fester Bestandteil kommerzieller Simulationsprogramme. Dabei können die Eingriffsmöglichkeiten für die einzelnen Simulationsanwender sehr unterschiedlich beschaffen sein. Die meisten Postprozessoren bieten eine Auswahl zwischen verschiedenen Visualisierungstechniken an, manche erlauben nur vorgegebene Verfahren.

Erzeugung des Bühnenraums

Ziel einer jeden Simulationsvisualisierung ist es nun also, die in dem Simulationsexperiment errechneten Wertverläufe darzustellen. Da sich diese in der Regel über den dreidimensionalen Raum erstrecken, muß auf dem zweidimensionalen Bildschirm durch eine perspektivische Darstellung ein Anschein von Dreidimensionalität erzeugt werden.

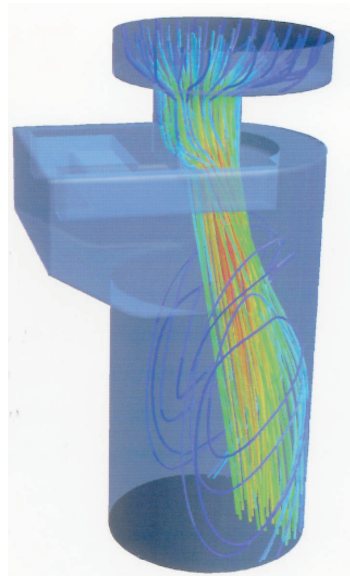


Abbildung 9 Visualisierung der Rechenergebnisse für die Strömung durch ein Ventil. Das Bauteil ist der Abbildung in perspektivischer Darstellung hinterlegt und steckt so den Raum ab, in dem die Strömungsfäden sich tummeln.⁵ Quelle: Prospekt „Strömungssimulation in Chemie und Verfahrenstechnik“ der Firma FLUENT von 1998.

5 Alle Abbildungen dieses Kapitels dienen lediglich der Verdeutlichung der zur Visualisierung eingesetzten Techniken. Die Angaben zu dem Inhalt der Abbildungen beschränken sich daher auf das zum Verständnis der Visualisierungsstrategie notwendige.

Dies kann, wie etwa bei den in Abbildung 9 oder 14 gezeigten Visualisierungen, durch die perspektivische Darstellung eines dreidimensionalen Körpers geschehen. In diesem „Bühnenraum“ werden dann die mit Hilfe einer der folgenden Techniken codierten Rechenergebnisse dargestellt.

Farbcodierung

Die Farbcodierung ist die am häufigsten eingesetzte Codierungstechnik in Simulationsbildern. Um die Simulationsergebnisse über Farben darzustellen, werden der abzubildenden Größe innerhalb eines Wertebereiches Bildschirmfarben zugeordnet. So könnte etwa für die Darstellung eines Temperaturverlaufs „Rot“ als Farbe zur Kennzeichnung von Temperaturen, die über einem bestimmten Grenzwert liegen, festgelegt werden. Bei einer Farbcodierung werden in der Regel nicht nur an den diskreten Gitterpunkten, an denen Rechenergebnisse vorliegen, deren Zahlenwerte durch Farbgebung kenntlich gemacht. Stattdessen wird die gesamte Bildfläche eingefärbt, so daß der Eindruck entsteht, es läge eine lückenlose Menge von Lösungswerten vor. Die farbliche Codierung tendiert daher dazu, den diskreten Charakter einer numerischen Lösung in den Hintergrund zu drängen. In einigen Fällen wird die Zuweisung zwischen Zahlenwerten und Farben so fein gewählt, daß die Bereiche ineinander verschwimmen (vgl. Abbildung 11). Dadurch wird der Eindruck eines Wertekontinuums noch verstärkt. In anderen Fällen werden Zonen verschiedener Wertebereiche gezielt farblich klar voneinander abgegrenzt (vgl. Abbildung 10). Diese Vorgehensweise läßt eine klare Schichtung entstehen. Die Farben können innerhalb eines Farbwertes in Intensität oder Schattierung variieren. Dadurch werden zusätzliche Effekte wie z. B. eine Tiefenwirkung erzeugt. In jedem Fall führt die farbliche Kennzeichnung der Zahlenwerte dazu, daß sich auf dem Bild Strukturen ausbilden, wie es sich besonders deutlich in Abbildung 12 erkennen läßt. Bereiche mit einer einheitlichen Farbe bilden abgegrenzte, in sich homogene Figuren. Andere mögliche Figuren werden über die Einstellung der Farbabstufung zum Verschwinden gebracht. Immer dann, wenn die Simulation keinen festen abgegrenzten Körper behandelt, sondern z. B. die Veränderungen in einem Fluid, entsteht auch die äußere Kontur des Bildes erst dadurch, daß eine Schwelle bestimmt wird, ab der einer Größe überhaupt Farben zugewiesen werden, die von der des Hintergrundes abweichen (vgl. Abbildung 12). Andere Farbabstufungen würden in solchen Fällen vollkommen abweichende Formen entstehen lassen.

4.2 Die Bildproduktion - Malen nach Zahlen

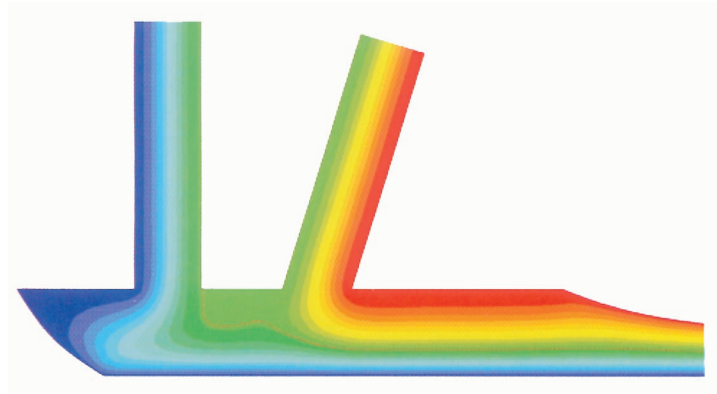


Abbildung 10 Visualisierung der Berechnung eines Strömungsfeldes bei einem Beschichtungsvorgang. Hier erzeugt die relativ grobe Farbabstufung eine klare Schichtung. Quelle: Prospekt „Strömungssimulation in Chemie und Verfahrenstechnik“ der Firma FLUENT von 1998.

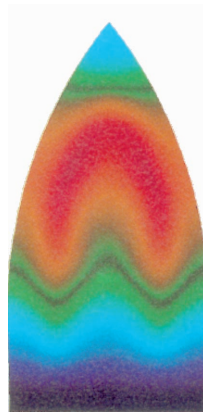


Abbildung 11 Visualisierung der Berechnungsergebnisse für eine Temperaturverteilung in der Sohle eines Dampfbügeleisens. Hier verschwimmen die Farben aufgrund der feinen Abstufung ineinander, und erzeugen so den Eindruck eines Wertekontinuums. Quelle: Spektrum der Wissenschaft. Dossier 2/1999 „Software“ S. 24.

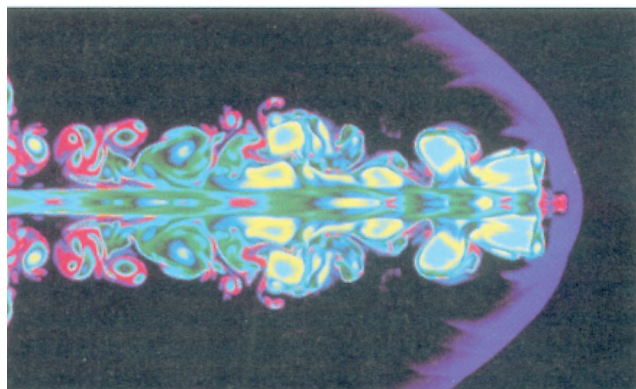


Abbildung 12 Visualisierung der berechneten Dichteverteilung in einer Gaswolke, die sich mit Überschallgeschwindigkeit bewegt (Überschalljet). Durch die farbliche Codierung bilden sich Strukturen aus, die sich von dem Hintergrund abheben. Quelle: Kaufmann/Smarr (1994, S. 76).

Durch die Gestaltung der Farbzuzuweisung wird das Aussehen einer Visualisierung also erheblich beeinflusst. Die Wahl der Farben ist – im Rahmen der digital erzeugbaren Farbpalette – prinzipiell frei.⁶ Dennoch lassen sich gewisse Konventionen beobachten. So wird häufig rot für „kritische“ Bereiche, in denen z. B. hohe Temperaturen oder Spannungen auftreten, verwendet (siehe etwa Abbildung 17). Außerdem läßt sich die Tendenz erkennen, die Farben so zu wählen, daß sie der Alltagserfahrung entsprechen. So werden z. B. die Wertverläufe in Wasser vorzugsweise blau oder die in glühendem Metall gelb gekennzeichnet, obwohl es sich ja an sich – dies sei erinnert – nicht um die Darstellung von Wasser oder Metall handelt, sondern um abstrakte physikalische Größen wie Druck oder Temperatur innerhalb dieser Bereiche.

In Simulationsbildern werden fast immer intensive leuchtende Farben verwendet. Häufig sind diese in der Reihenfolge des Regenbogens mit den Zahlenwerten geordnet. Nuancierte Farbabstufungen innerhalb einer Farbe, blasse Farben sowie graue, grüne oder braune Pastelltöne werden fast nie eingesetzt. Dies ist keine technische Notwendigkeit und auch nicht aus einem Bestreben nach Nutzerfreundlichkeit und Eindeutigkeit zu erklären. So weist der Informationsdesigner Edward Tufte⁷ darauf hin, daß gedeckte Farben dem menschlichen Unterscheidungsvermögen entgegenkommen, während grelle und kontrastreiche Farben dazu neigen, unerwünschte Effekte („noise“) zu produzieren. Außerdem ist – Tufte zufolge – die Ordnung der Regenbogenfarben den meisten Menschen nicht unmittelbar präsent und daher zur Codierung von Wertreihungen eher problematisch. Überhaupt rät er dazu, sich bei einem sorgfältigen Informationsdesign wegen der damit verbundenen Unwägbarkeiten nicht allein auf die farbliche Kennzeichnung zu verlassen, sondern andere Methoden zur Unterstützung der Informationsvermittlung hinzuzunehmen.⁸

Daß die anerkannten Regeln guten Informationsdesigns in Simulationsbildern so wenig zur Geltung kommen, ist nicht auf eine Inkompetenz der Bildproduzenten oder auf mangelnde Sorgfalt zurückzuführen. Es deutet vielmehr darauf hin, daß eine exakte zahlenmäßige Auswertung für die meisten Simulationsbilder gar nicht intendiert ist. Stattdessen ist in häufig eine intuitive und qualitative Auswertung des Farbbildes für die Zwecke der Darstellung ausreichend.⁹ Dies läßt sich auch daran erkennen, daß in vielen Fällen die Skala, auf der die Farben und die Zahlenwerte einander zugeordnet werden, gar nicht erst mit abgebildet ist, obwohl diese für eine genaue Bildauswertung unerlässlich ist.¹⁰ Es müssen also andere Kriterien als solche der möglichst deutlichen Informationsübermittlung sein, denen die Farben für Simulationsbilder genügen. Es zeigt sich damit, daß die Farben der Simulationsbilder einer jener Faktoren sind, die dem Simulationsbild gegenüber dem Zahlensatz zusätzliche

6 Für den einzelnen Anwender bestehen allerdings Vorgaben durch die verwendete Software.

7 Siehe Tufte (1990, S. 81-95 „Color and Information“).

8 „Color itself is subtle and exacting. And, furthermore, the process of translating perceived colormarks on paper into quantitative data residing in the viewer's mind is beset by uncertainties and complexities. These translations are nonlinear (...), often noisy and idiosyncratic, with plenty of differences in perception found among viewers (including several percent who are color deficient).“ Tufte (1990, S. 76).

9 Mit einer rein visuellen zahlenmäßigen Interpretation ist ein Betrachter ohnehin schnell überfordert. Tufte bezeichnet 20-30 Farben als das Maximum für eine sinnvolle Darstellung obwohl selbst das ungeschulte Auge prinzipiell in der Lage sei, mehr als 20.000 Farben zu unterscheiden. Die Begrenzung ist nach Tufte mehr der Beschränktheit des visuellen Erinnerungsvermögens als der des Sehvermögens geschuldet (vgl. Tufte 1990, S.81).

10 Vgl. den Abschnitt: „Die Decodierungshilfen“ auf Seite 197.

Bedeutungen verleihen, die in der kulturellen und sozialen Vermittlung menschlicher Wahrnehmung begründet sind. Um dem Weltbildcharakter des Simulationsbildes näherzukommen, muß also gefragt werden, welches Bild von Welt gerade durch die grellen Bonbonfarben der Simulationsbilder transportiert wird und was durch die Anlehnung an Farben aus der Alltagserfahrung impliziert wird. Zunächst sollen aber weitere spezifische Elemente der Simulationsbildgestaltung gesammelt werden.

Codierung durch Symbole

Bei einer symbolischen Codierung werden an den Knotenpunkten des Rechengitters, an denen Rechenergebnisse vorliegen, geometrische Elemente plaziert, die den für diese Stelle errechneten Wert einer physikalische Größe symbolisieren. Häufig werden etwa, wie bei der in Abbildung 10 gezeigten Visualisierung einer Wettervorhersage, Pfeile abgebildet, deren Länge mit dem Wert der dargestellten Größe variiert. Zusätzlich kann die Ausrichtung des Pfeiles die Richtung der abgebildeten Größe anzeigen. Diese Darstellungsform bietet sich daher für die Codierung gerichteter Größen, wie einer Kraft oder einer Geschwindigkeit, an. Eine andere Möglichkeit der geometrischen Codierung ist der Einsatz von Kugeln oder Würfeln deren Durchmesser bzw. Kantenlänge mit der Größe der berechneten Werten variiert. In kommerziellen Simulationsprogrammen sind häufig feste Zuweisungen von physikalischen Größen zu geometrischen Symbolen implementiert. Um davon abweichende Codierungen vorzunehmen, bedarf es in viel stärkerem Maße als bei der Farbcodierung eines erheblichen Aufwandes an Informationsdesign und Programmierung. Die Codierung durch geometrische Symbole hebt den diskreten Charakter der numerischen Lösung gerade hervor.

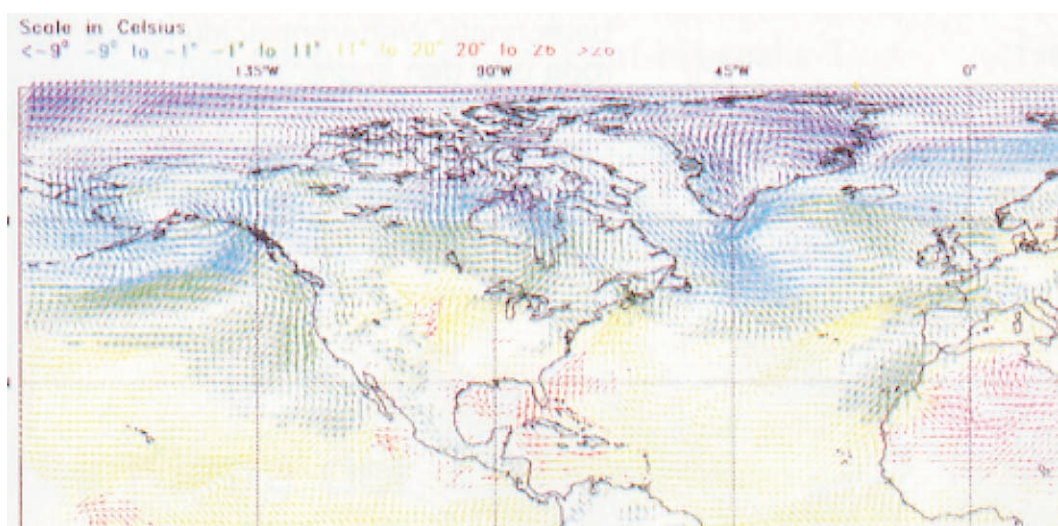


Abbildung 13 Darstellung einer simulierten Wettervorhersage (Ausschnitt). Länge und Orientierung der Pfeile geben Windgeschwindigkeit und Richtung an. Die Lufttemperatur ist farblich codiert. Als Hintergrund ist der Abbildung eine Landkarte unterlegt. Quelle: Kaufmann/Smarr (1994, S. 199).

Das klassische Koordinatensystem

Koordinatensysteme dienen der Präsentation wissenschaftlicher Ergebnisse in einer zeitlichen, räumlichen oder anderen Ordnung. Für Simulationsgraphiken eignet sich diese Technik jedoch nur bedingt. Besonders für die Darstellung von Rechenergebnissen in drei Raumdimensionen würde die zusätzliche Einführung einer Koordinaten-

achse für die Werte der berechneten Größe (z. B. die Spannung) zu einer sehr unanschaulichen Abbildung führen. Die klassische Koordinatendarstellung zur Veranschaulichung der Verteilung physikalischer Größen über einen Raum befindet sich daher zumindest in ingenieurwissenschaftlichen Publikationen gegenüber der farbcoodierten Simulationsgraphik im Rückzug. Häufig werden jedoch in einer weiteren Transformationsstufe die Ergebnisse der Simulation so zusammengefaßt, daß sie sich wieder in Form eines Koordinatensystems fassen lassen. Dadurch können wiederum mehrere Simulationen untereinander oder Simulationsergebnisse mit Meßwerten auf einen Blick verglichen werden. Solche Vergleiche sind mit Simulationsbildern nur in begrenztem Umfang möglich.

Bildreihungen

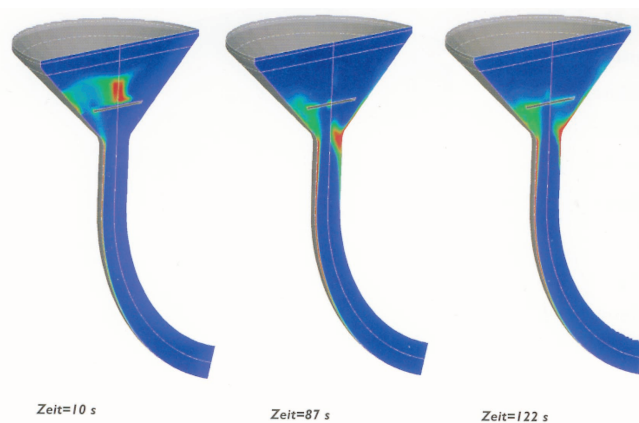


Abbildung 14 Visualisierung errechneter Feststoffkonzentrationen in einem Steigtrichter. Der zeitliche Verlauf wird durch eine Reihung von Bildern, die den Systemzustand zu verschiedenen Zeitpunkten darstellen, gekennzeichnet. Quelle: Prospekt „Strömungssimulation in Chemie und Verfahrenstechnik“ der Firma FLUENT von 1998.

Mit der Hilfe der bisher beschriebenen Übersetzungstechniken wurden zeitlich fixierte Darstellungen, also gewissermaßen Schnappschüsse eines Systemzustandes zu einer festen Zeit, hergestellt. Darstellungen dieser Art sind für die Visualisierung stationärer Zustände geeignet. Solche „Ruhezustände“ werden von einem System eingenommen, wenn eine Anregung oder Störung abgeklungen ist. Simulationen liefern aber auch Informationen über zeitliche Entwicklungen eines Systems.¹¹ Um diese zusätzlich darzustellen, muß eine weitere Dimension in die Abbildung eingeführt werden. Soll der dreidimensionale Raumeindruck erhalten bleiben, verbietet es sich, eine Koordinatenachse für die Zeit einzuführen. Daher müssen andere Techniken angewendet werden, um die Zeitdimension bildlich zu erfassen. Häufig werden, wie bei der in Abbildung 14 gezeigten Visualisierung eines zeitabhängigen Prozesses, verschiedenen Zeiten zugehörige „Schnappschüsse“ nebeneinander angeordnet, so daß der errechnete zeitliche Verlauf des Vorganges deutlich wird.¹² Auf diese Weise kön-

11 Die Möglichkeit, etwas über zeitliche Veränderungen von Systemen zu erfahren, ist in vielen Fällen gerade einer der Vorteile von numerischen Berechnungen gegenüber klassischen Methoden, die nur den Gleichgewichtszustand liefern.

12 Tufte (1990) bezeichnet solche „Ausflüchte aus dem Flachland“ (d. h. aus der Zweidimensionalität des Papiers) als „Small Multiples“.

nen auch bewegte Darstellungen erzeugt werden. Solche „Animationen“ können in exakt der gleichen Geschwindigkeit ablaufen wie der Originalvorgang. Es entsteht der Eindruck, der abgebildete Vorgang sei nicht nur errechnet, sondern tatsächlich abgelaufen und dabei gefilmt worden.

Konturverschiebungen

Allen bisher beschriebenen Visualisierungstechniken war gemeinsam, daß Verläufe abstrakter physikalischer Größen im Inneren materieller Strukturen dargestellt wurden, so daß im doppelten Sinne „Unsichtbares“ sichtbar gemacht wurde. Nicht alle Simulationsergebnisse bedürfen aber, wie die Darstellung innerer Größen in physikalisch technischen Systemen, einer solchen Um-Codierung, um visuell interpretierbar zu sein. Eine Simulation liefert auch Ergebnisse darüber, wie sich Körperkonturen, wie etwa die in Abbildung 15 dargestellte Wasseroberfläche, in Form und Lage verändern.

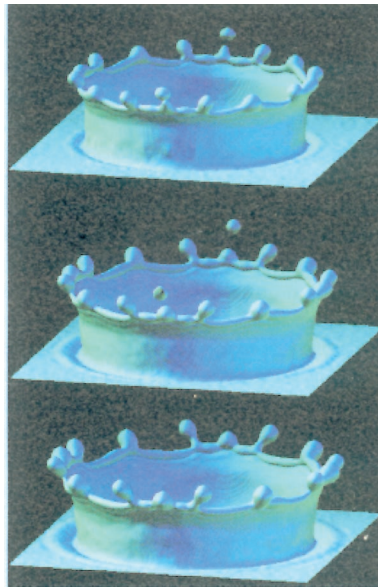


Abbildung 15 Darstellung der Simulation eines Tropfenfalls auf eine Wand mit einem dünnen Flüssigkeitsfilm (Splash). Hier ist kein Verlauf innerer Größen, sondern lediglich die Verformung eines Gebildes gezeigt. Perspektivische Darstellung und Schattierung rücken das Bild in die Nähe einer Photographie, obwohl die Farbwahl deutlich von der Realität abweicht. Quelle: Spektrum der Wissenschaft. Dossier 2/1999 „Software“ S. 63.

Dies sind Vorgänge, die an einem realen Ereignis auch „direkt“ – sei es mit bloßem Auge oder sei es mit geeigneten Instrumenten – beobachtet werden könnten. Hier müssen den abgebildeten Strukturen durch die Algorithmen des Graphikprogrammes ihre Plazierungen auf dem Computerbildschirm, also den Bildpunkten ihre veränderten Koordinaten, zugewiesen werden. Die hypothetische Bewegung des simulierten Systems in der Realität wird in eine Bewegung von Bildpunkten auf dem Computerbildschirm umgerechnet. Dabei muß eine Blickrichtung auf die abgebildeten Dinge, wie z. B. die Sicht auf einen Schnitt oder auf eine bestimmte Ansicht, ausgewählt werden. In den meisten Fällen werden in einer Simulationsgraphik die Veränderungen äußerer Konturen gleichzeitig mit Verläufen von inneren Größen dargestellt (vgl. auch Abbildung 17).

Kombinationen und Spezialformen

Die genannten Verfahren zur Codierung von Zahlenwerten in einer bildlichen Form können auf verschiedene Weise miteinander kombiniert werden. So transportieren geometrische Elemente häufig zusätzliche Informationen über ihre Farbe (vgl. Abbildung 13). Manche Visualisierungen arbeiten mit allen Codierungstechniken zugleich. Animationen und zeitlich gereihte Abbildungen enthalten stets auch codierte Informationen über Raumverteilungen von Werten. In allen Simulationsbildern können sowohl Konturveränderungen als auch innere Größen in einer der genannten Codierungen abgebildet sein. In einigen speziellen Anwendungen, wie etwa der in Abbildung 16 gezeigten Unwettervisualisierung, werden eigens auf den Problemfall zugeschnittene Visualisierungsstrategien eingesetzt.

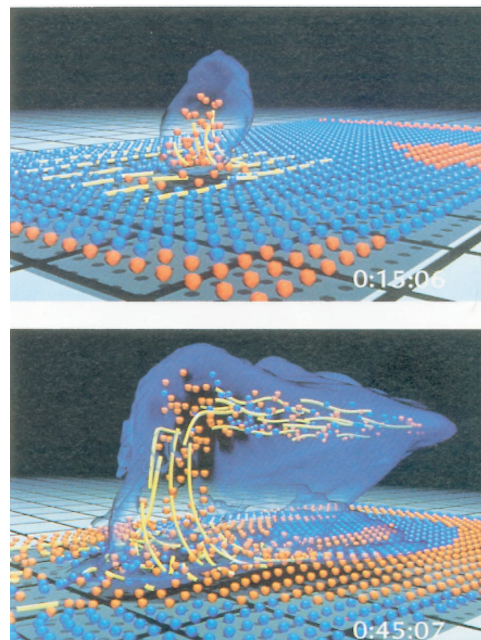


Abbildung 16 Visualisierung einer Unwettervisualisierung. Die Spurbällchen und die von ihnen gezogenen Bänder zeigen die Bewegung der Luftströmungen an. Diese spezielle Form der Visualisierung ist eigens von dem Informationsdesigner Edward Tufte entwickelt worden. Die Verwendung von sogenannten „Tracer Partikeln“, also fiktiven Teilchen, deren Bahnen den Verlauf von Strömungen anzeigen, ist auch in anderen Strömungsvisualisierungen üblich. Quelle: Kaufmann/Smarr (1994, S. 28).

4.3 Die Bildelemente

Aus den vorangegangenen Ausführungen läßt sich schon ersehen, daß ein Simulationsbild mehr enthält als nur die codierte Abbildung der berechneten Werte. Einige dieser zusätzlichen Elemente werden im folgenden aufgeführt. Welche dieser Bestandteile tatsächlich vorhanden sind, hängt von dem Kontext ab, in dem das Bild verwendet wird. So wird in einer Veröffentlichung aus dem Bereich der numerischen Mathematik großer Wert auf Zusatzinformationen über das Rechengitter und die Einzelheiten zu dem verwendeten Lösungsverfahren gelegt werden. In anderen Publikationen wird dagegen eine erhöhte Sorgfalt auf die Ausarbeitung des Bildhintergrundes verwendet werden.

Die Decodierungshilfen

Damit aus einer Simulationsgraphik Informationen abgeleitet werden können, muß zu der Abbildung die Übersetzungsregel, der „Code“, angegeben sein. Bei der Farbcodierung, die in den meisten Simulationsgraphiken einen Teil der Information verschlüsselt, kann dies durch eine Farbskala geschehen, wie etwa in Abbildung 17 zu sehen ist. Auf einer solchen Skala sind die verwendeten Farben zusammen mit den entsprechenden Zahlenwerten angegeben. Unabhängig davon, wie fein die tatsächliche Farbzueweisung vorgenommen wurde, ist es durchaus üblich, daß auf der Skala nur einige der Abstufungen angegeben sind

Statt einer Skala können auch Texte, wie etwa: *„Bereiche mit hohem Druck sind blau, solche mit niedrigem Druck gelb dargestellt“* oder *„An den roten Stellen treten die höchsten Spannungen auf“* die Auswertung anleiten. In solchen Fällen bleiben die Zwischenstufen unentschlüsselt.

Die Entschlüsselung geometrischer Symbole wird ebenfalls meistens durch Texte wie: *„Die Länge und Orientierung der Pfeile kennzeichnet die örtliche Geschwindigkeit“* oder *„Die Größe der Kugeln entspricht der absorbierten Flüssigkeitsmenge“* ermöglicht. Noch weniger als bei der Farbcodierung ist hier von der Betrachtung des Bildes ein Rückschluß auf die exakten Zahlenwerte möglich. Daher sind auch keine entsprechenden Skalen erforderlich. Die tatsächliche räumliche Lage der abgebildeten errechneten Wertverläufe in dem Originalsystem kann aus der bloßen Betrachtung eines Simulationsbildes nur sehr grob ermittelt werden. Auch diese ungefähre Zuordnung zwischen realem und visualisierten Raum ist nur möglich, wenn ein Koordinatensystem oder ein Maßstab auf dem Simulationsbild abgebildet ist.

Das Rechengitter

An anderer Stelle in dieser Arbeit wurde beschrieben, daß die Anwendung computergestützter numerischer Berechnungsverfahren es erfordert, den Ausschnitt von Welt, der untersucht werden soll, mit einem Gitter zu überziehen.¹³ An den Knotenpunkten des Gitters liegen dann später die Lösungswerte vor. Je nach Genauigkeit der Berechnung variiert das Rechengitter daher in seiner Feinheit. Um die Qualität der abgebildeten Lösung beurteilen zu können, ist es notwendig, die Feinheit des Gitters zu kennen, denn über die Bereiche zwischen den Knoten liegt keine Information vor. Das Rechengitter ist vor allem dann abgebildet, wenn es explizit darum geht, unterschiedliche Gitterstrukturen zu vergleichen. Dieses Gerüst, das sich je nach Anwendung (wie ein Klettergerüst) durch einen Raum hindurch oder über die Oberfläche eines Körpers (wie ein Netz um einen Rollbraten!) zieht, reproduziert notwendig die Form des zu berechnenden Raumstückes. Wenn das Gitter daher, wie bei der in Abbildung 17 gezeigten Visualisierung, auf einer Simulationsgraphik mit abgebildet ist, wird dadurch der räumliche Eindruck unterstützt. Andererseits wird der Eindruck „natürlicher“ Kontinuität gestört. Außerdem wird der berechnete Bereich stark von dem Hintergrund oder anderen überlagerten Bildanteilen abgesetzt. Die Abbildung des Rechengitters auf einem Simulationsbild bringt daher den Produktionsprozeß des Bildes in Erinnerung, während ein Weglassen dieses Herstellungsinstrumentes die Produziertheit des Bildes eher vergessen läßt.

¹³ Vgl. Abschnitt 3.4.2.

4.3 Die Bildelemente

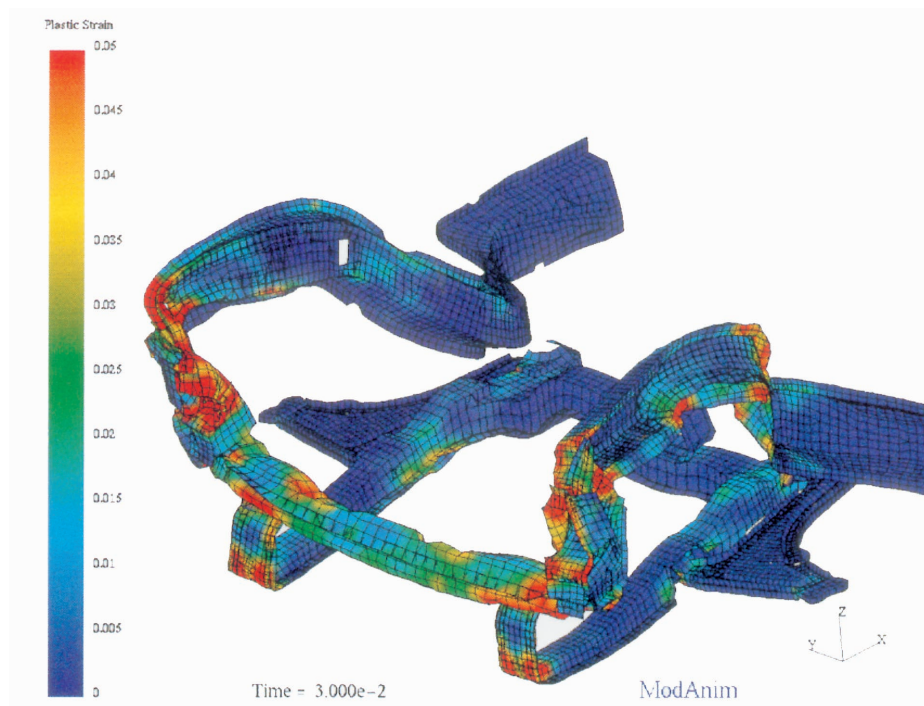


Abbildung 17 Visualisierung der berechneten Verformung eines Kraftfahrzeugrahmens (Crashsimulation). Der Grad der plastischen Verformung ist farblich gekennzeichnet. Die Skala auf der linken Seite gibt die Zuordnung zwischen Farben und Werten an. Das Rechengitter ist mit abgebildet. Rechts unten ist ein Koordinatensystem angedeutet. Quelle: Fröhlich (1995, S. 206).

Hintergrund

Zur Gestaltung des Hintergrundes einer Simulationsvisualisierung bestehen zahlreiche Möglichkeiten. Dadurch nämlich, daß Simulationsbilder in der computergerechten digitalen Form vorliegen, sind die codierten Rechenergebnisse problemlos mit anderen digitalen Bildern kombinierbar. Diese leichte Überlagerbarkeit ist eine der Eigenschaften digitaler Bilder, die sie gegenüber anderen Abbildungsformen für die Verwertung im Wissenschaftsbetrieb so wertvoll machen. So dienen für geographische Simulationen z. B. des Wetters oder der Klimaentwicklung häufig Landkarten als Hintergrund (vgl. Abbildung 13). Auf vielen Simulationsbildern sind die Objekte, deren Wechselwirkung mit der Umgebung durch die Simulation untersucht wird, im Hintergrund der Visualisierung abgebildet. Dies kann, wie oben beschrieben wurde zur Kennzeichnung des Abbildungsraumes aber auch anderen Zwecken dienen. Bei ingenieurwissenschaftlichen Simulationen sind es in der Regel technische Artefakte, wie etwa ein Flugzeugflügel, ein Balken oder ein Motorenteil, die in dieser Weise in das Simulationsbild „eingebildet“ sind. Dabei kann es sich, wie in Abbildung 9 um schematische Darstellungen aber auch, wie in Abbildung 18 um photorealistische Einblendungen handeln. Die Gestaltung des Hintergrundes ist offensichtlich, ebenso wie die Auswahl der Farben, über technische Notwendigkeiten hinaus deutungsbedürftig.

4.4 Was transportiert das Simulationsbild?

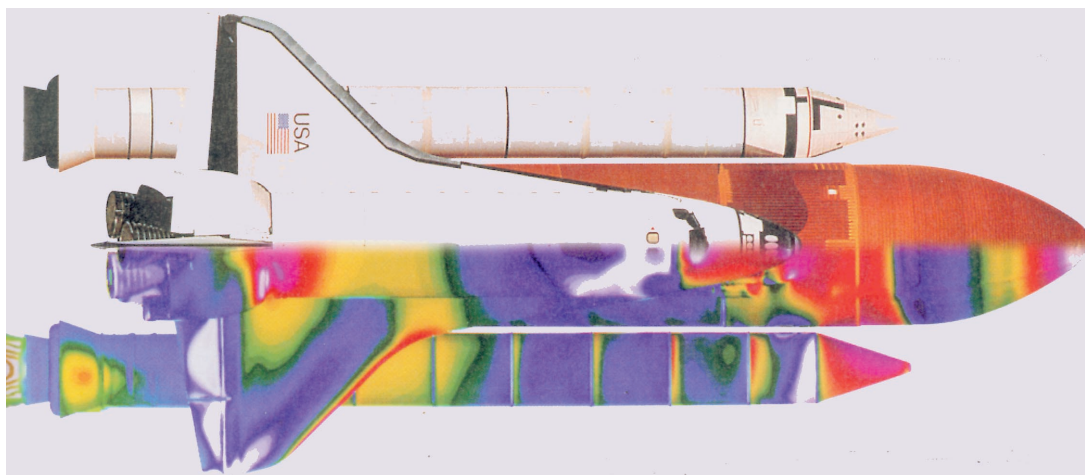


Abbildung 18 Transportiert das Simulationsbild mehr als die „Luftdruckwerte auf der Oberfläche der Raumfähre Space Shuttle im Steigflug“ ... ? Quelle: Spektrum der Wissenschaft. Dossier 2/1999 „Software“ S. 45.

4.4 Was transportiert das Simulationsbild?

Bisher wurde beschrieben, wie bei der Visualisierung von Daten aus Computersimulationen ein langwieriger Prozeß von verschiedenen Transformationen durchlaufen wird. Am Ende dieses Übersetzungsvorganges steht häufig ein scheinbar „reines“ Abbild eines natürlichen Vorganges und seiner Ursachen, dem die Herstellungsarbeit nicht mehr anzusehen ist. Wenn es sich aber bei der Erstellung solcher Bilder um einen kontingenten Prozeß handelt, dessen Ergebnis hochgradig von der gezielten Verwendung technischer Mittel abhängig ist, kann ein Simulationsbild nicht mehr als das getreuliche Abbild natürlicher Vorgänge im Computer aufgefaßt werden, wie es in den meisten ingenieur- und naturwissenschaftlichen Veröffentlichungen wie selbstverständlich geschieht. Damit stellt sich die Frage, welches Weltbild das Simulationsbild transportiert. Diese Frage soll hier, wie in der Einführung des Kapitels schon angedeutet wurde, auf zwei Ebenen behandelt werden. Zunächst wird das Simulationsbild in Abschnitt 4.4.1 als Vermittlungsinstrument von inhaltlichen Argumenten in wissenschaftlichen und anderen politischen Kontroversen vorgestellt. Dabei soll es ausdrücklich nicht darum gehen, Fälle von Bildmanipulation zur Stützung „falscher“ wissenschaftlicher Auffassungen aufzudecken.¹⁴ Stattdessen wird jedes dieser Bilder als ein bewußt gestalteter Ausdruck bestimmter Auffassungen von Welt verstanden. Auf einer zweiten Ebene soll jedoch in Abschnitt 4.4.2 gefragt werden, mit welcher Rhetorik ein typisches Simulationsbild allein aufgrund seiner Bildeigenschaften spricht. So wird hier etwa nach den Wirkungen der bunten Farben dieser Bilder und deren typischer Kombination von Inhalten gefragt.

¹⁴ Fälle von Bildmanipulation in diesem Sinne werden durch das computergestützte Bilderzeugungsverfahren, das unterschiedslos auch wenig plausible Rechenergebnisse visualisiert, geradezu ideal ermöglicht. Die Aufdeckung solcher Fälle ist aber nicht die Stoßrichtung dieser Untersuchung.

4.4.1 Das Simulationsbild als Argument

In Kapitel 3 dieser Arbeit wurde beschrieben, daß jeder Computersimulation von physikalisch technischen Systemen ein mathematisches Modell zugrundeliegt, das wiederum auf theoretischen technisch wissenschaftlichen Repräsentationen des Gegenstandes beruht. Ein Simulationsbild, das aus einem solchen Verfahren hervorgeht, reproduziert notwendig die Eigenschaften des zugrundeliegenden Modells. Es macht die Konsequenzen, die eine theoretische Beschreibung der Struktur eines Systems für das Verhalten des Systems in konkreten Fällen hat, sichtbar. Damit rekontextualisiert es die betreffende Theorie auf anschauliche Weise und steht als ein Argument für deren Wahrheit ein.

Die Beschreibung der Codierungstechniken hat jedoch gezeigt, daß die Visualisierungstechnologie eben nicht lediglich sichtbar macht. Vielmehr entsteht mit der Simulationsabbildung eine eigene Repräsentationsform, die es den beteiligten Akteuren ermöglicht, Einfluß auf das Ausgangsprodukt – die Simulationsgraphik und damit auf deren Interpretation und Weiterverarbeitung – zu nehmen. Da es sich hier in der Regel um dieselben Akteure handelt, die auch die betreffende Forschung betreiben, ergeben sich neue Verquickungen zwischen Erkenntnisinteresse, theoretischen Vorannahmen, bewußten Fokussierungen auf bestimmte Aspekte und Visualisierung von Forschungsergebnissen. So kann durch die Art der Codierung, die bei der Bilderzeugung verwendet wird, erreicht werden, daß diejenigen physikalischen Entitäten, die in der Modellbildung eine wesentliche Rolle spielen, auch das Erscheinungsbild der Abbildung prägen. Gerade die „spurenlose“ digitale Bildbearbeitung bietet besondere Möglichkeiten für eine solche Produktion von Bildargumenten. So bemerken etwa Bettina Heintz und Jörg Huber, die sich im Rahmen einer umfangreichen Untersuchung „wissenschaftlicher Visualisierungsstrategien“ auch mit der Besonderheit digitaler Bildverarbeitungsverfahren auseinandergesetzt haben:

„Im Gegensatz zu analogen Aufschreibesystemen - der Photographie, der Röntgentechnik und den selbstregistrierenden Instrumenten der Biologie und Medizin - erlauben die digitalen Bildtechniken, interaktiv in den Prozeß der Bildgenerierung einzugreifen. Die Interpretation ist der Bildgebung nicht nachgeschaltet, sondern Herstellung und Interpretation sind Prozesse, die sich wechselseitig durchdringen“ (Heintz/Huber 2001, S.22)

Für die Simulationsvisualisierung ergeben sich spezifische Möglichkeiten, die Bilderstellung zu steuern. Die Wahl der Farbcodierung kann, wie es oben beschrieben wurde, dazu eingesetzt werden, gezielt Objekte zu erzeugen und andere zum Verschwinden zu bringen. Effekte, die für die Akteure von besonderem Interesse sind, können hervorgehoben, andere wiederum marginalisiert werden. Für diejenigen Bereiche, denen die Theorie ein besonderes Interesse zuwendet, kann eine besonders sorgfältige Darstellung, z. B. eine sehr feine Auflösung, gewählt werden.¹⁵ Die Techniken der Visualisierung von Simulationsergebnissen können in dieser Weise dazu benutzt werden, gezielt Bilder herzustellen, die in verschiedenen Auseinandersetzungen

15 Das Phänomen, daß an den Bereichen, in denen laut Theorie besondere Effekte vermutet werden, auch besonders genau hingesehen wird, greift natürlich schon vor der Visualisierung, wenn bei der Erzeugung des Rechengitters entschieden wird, wo überhaupt nur Daten produziert werden. Eine interessante Frage, die in empirischen Untersuchungen verfolgt werden könnte, ist es, inwieweit bei der Modellierung und Simulation die Antizipation der Abbildung schon eine Rolle spielt.

4.4 Was transportiert das Simulationsbild?

gen als Argumente fungieren können. Es ist zu beobachten, daß diese Möglichkeit sowohl in technikinternen Debatten als auch in eher an die Öffentlichkeit gerichteten technikwissenschaftlichen Statements verstärkt genutzt wird. So werden z. B. in der Debatte um den Klimaschutz immer wieder Simulationsbilder von der Entwicklung des globalen Klimas unter verschiedenen Randbedingungen als Argumente verwendet. Und bei den beiden Simulationsexperten Larry Smarr und William Kaufmann heißt es im Zusammenhang mit der Simulation von Kernreaktoren:

„Solche Simulationen sind nicht nur ein wichtiges Hilfsmittel bei der Entwicklung neuer Reaktoren; die mit ihnen berechneten Graphiken können auch dazu beitragen, das Vertrauen der Öffentlichkeit in die Kernindustrie wiederzugewinnen.“ (Kaufmann/Smarr 1994, S.180).

4.4.2 Die Rhetorik der Simulationsvisualisierung

Was ist nun das Charakteristische eines Bildes, das durch Visualisierungstechniken erzeugt wird und mit den beschriebenen Elementen versehen ist? Welche Sichtweise auf die abgebildeten Phänomene transportiert es allein aufgrund seiner Darstellungsform? Welche spezifischen Stilmittel sind Bestandteil der Bildgattung „Simulationsvisualisierung“?

Gegenstand: Aufgeschnittene Materie

Allen Simulationsbildern ist gemeinsam, daß auf ihnen innere Strukturen eines Geschehens abgebildet sind, die dem bloßen menschlichen Auge verborgen sind. Diese Unsichtbarkeit hat zwei Ursachen. Zum Einen handelt es sich um das Geschehen, das sich im Inneren eines Gebildes abspielt, das normalerweise nur von außen betrachtet werden kann. Zum Anderen zeigen die bildlichen Darstellungen die analytischen Größen der naturwissenschaftlichen Theorie also abstrakte nicht-sichtbare Entitäten. Die Codierungstechniken verwandeln die berechneten Verläufe dieser abstrakten Größen in farbige Gebilde mit klaren Konturen. Innere Form wird somit in sichtbare Muster transformiert. Es entsteht der Eindruck, es seien die in der Natur verborgenen Formen und Strukturen ausfindig gemacht und abgebildet. Häufig ähneln die dabei entstehenden Muster solchen, die von anderen Phänomenen her als äußere beobachtbare Formen bekannt sind. So zeigen sich vertraute Formelemente wie Wellen oder Wirbel. Gleichzeitig tauchen auf den Bildern Gegenstände aus der vertrauten Objektwelt auf, deren Verhalten gezeigt und erklärt wird. Trotz der Abstraktheit der dargestellten Größen entsteht der Eindruck, es sei ein konkreter tatsächlich abgelaufener oder zumindest so möglicher Vorgang abgebildet. Innerhalb eines Bildes sind ein Geschehen, dessen innere Dynamik und deren Ursachen präsent. Das Objekt mit seinen inneren Strukturen scheint mir die für die Simulationsvisualisierung typische Gegenstandskonstellation zu sein. Die Visualisierung präsentiert eine aufgeschnittene und in ihrem Inneren durchleuchtete Materie. Durch den häufig nahtlosen Übergang zwischen abgebildeter Oberfläche und berechnetem „innerem Geschehen“ entsteht der Eindruck, jeder beliebige Weltausschnitt könne „aufgeschnitten“ und in seiner Struktur gezeigt werden. Wissenschaftlich-technische Forschung gewinnt mit dieser Präsentationsform die Möglichkeit, auf unmittelbare Weise an das alltäglich Erfahrbare anzuknüpfen. Die Schnittstelle zu dieser Alltagserfahrung bilden vor allem die Hintergrundbilder. Diese vermitteln, daß hier Phänomene erklärt werden, die so auch in der Welt beobachtbar sind, oder daß Artefakte, deren Funktionieren vertraute

4.4 Was transportiert das Simulationsbild?

Selbstverständlichkeit ist, in jedem Aspekt ihres Verhaltens abgebildet werden können.

Stilmittel: Bonbonfarben als Markierungen wissenschaftlicher Autorität

Bemerkenswert ist jedoch, daß mit den gängigen Visualisierungen zwar an die Alltagserfahrung angeknüpft wird, aber dennoch keine naturgetreuen Darstellungen angestrebt werden. Vielmehr bleibt stets ein gewisses Maß an Verfremdung bestehen. Verantwortlich dafür sind vor allem die grellen, bunten Farben, sowie alle Bildelemente, die mit dem Berechnungsverfahren verknüpft sind, wie z. B. ein Rechengitter, Decodierungshilfen oder geometrische Codierungselemente. Mir scheinen diese synthetischen Elemente ebenso wie die realistischen Komponenten eine tragende Funktion für die Gesamtwirkung eines Simulationsbildes zu haben. Ich vermute, daß gerade die grellen, eindeutigen Farben und die klaren Formen Assoziationen aus der Welt der industriell produzierten und damit beherrschbaren Dinge wecken und damit in gewolltem Gegensatz zu dem wirren Farbgemisch unberechenbarer Wirklichkeit stehen. Die Möglichkeit, die Elemente des Bildes beliebig auseinanderzuhalten und umzubauen, wird durch die farbliche Ähnlichkeit mit Baukastenelementen oder Comickdarstellungen nahegelegt. So wird durch die Art der Darstellung der Eindruck von fast spielerischer Gestaltbarkeit erweckt.

Die Verwendung klarer Regenbogenfarben hat aber noch einen anderen Aspekt. Sie bewirkt meiner Ansicht nach, daß auch bei gedruckten Simulationsbildern die Herkunft derselben aus dem Computer gegenwärtig bleibt. Dies ist notwendig, da die Tatsache, daß es sich um ein vom Computer berechnetes Bild handelt, einen Großteil der Autorität des Bildes ausmacht. Die Ordnung des Bildes darf lediglich als eine „entdeckte“, nicht aber als eine bewußt gestaltete auftreten. Zu diesem Zwecke ist es sinnvoll, Farben zu verwenden, die mit synthetischen Computerbildern und nicht mit künstlerischen Werken assoziiert werden. Damit wird der Eindruck, es sei bewußt ein „schönes“ Bild produziert worden, vermieden. Ähnliches gilt für die anderen Elemente, die das Bild näher an seinen Produktionsprozeß heranrücken. Sie stören zwar den Eindruck natürlicher Einheit, verstärken aber den Aspekt der Exaktheit und Wissenschaftlichkeit, die durch die Herkunft aus dem Computer verliehen wird. Allerdings gilt die Betonung der Herstellung lediglich dem Rechenprozeß. Die aufwendige Produktion des Bildes aus den Simulationsergebnissen bleibt auch dabei verborgen.

Schöne simulierte Welt?

Ein weiteres Stilelement, das der Simulationsvisualisierung Überzeugungskraft verleiht, ist ihr ansprechendes Aussehen. Die abgebildete Materie wird auf diesen Bildern nicht mittels grauer, naturwissenschaftlicher Theorie analysiert, sondern auf eine farbenfrohe Weise repräsentiert, die Harmonie und innere Schönheit zum Ausdruck bringt. Dadurch entsteht der Eindruck, eine in der Welt im Verborgenen vorhandene harmonische und regelmäßige Struktur sei „gefunden“ und lediglich sichtbar gemacht worden.¹⁶ Die Schönheit der Abbildung, die so gar nicht den bekannten abstrakten Darstellungsweisen naturwissenschaftlicher Welterklärung entspricht, wird nicht dem Herstellungsverfahren, sondern der Welt selber zugeschrieben und spricht damit für die Wahrheit der Analyse. Es ist bemerkenswert, daß dieser scheinbar ganzheitliche Blick auf Naturvorgänge mit der numerischen Simulation gerade aus einem solchen naturwissenschaftlich technischen Zugang zur Welt hervorgeht, der in besonders extremer Weise eine Zerstückelung und Abtrennung der betrachteten Ausschnitte von

4.4 Was transportiert das Simulationsbild?

Welt voraussetzt. Als vermittelnde Instanz steht zwischen diesen scheinbar widersprüchlichen Eigenschaften von Simulationstechniken die Computertechnologie, die es auf die beschriebene Weise möglich macht, Diskretes so zusammenzusetzen, daß ein Bild am Ende mehr als tausend Zahlen aussagt.

Fazit - Argument der Simulationsrhetorik

Ein Simulationsbild präsentiert mit der Hilfe der genannten Stilmittel die konfuse, komplexe Realität als einen geordneten überschaubaren Raum mit diskreten behandelbaren Objekten. Es hat auch für Laien ohne Kenntnis der zugrundeliegenden Theorie aus Naturwissenschaft, Mathematik und Informatik eine Aussagekraft. Es vermittelt somit das Gelingen einer vollständigen Durchdringung der behandelten Ausschnitte von Welt, sowie deren kontrollierte Beeinflußbarkeit. Der Anspruch heutiger Technikwissenschaft, mit ihren Repräsentationen nicht nur oberflächliche Ähnlichkeiten zu liefern, sondern die behandelten Phänomene in ihrem Wesen zu erfassen und aktiv manipulieren zu können, wird mit diesen Abbildungen mächtiger als mit jeder Formel als erfüllt präsentierbar. An diesen universellen Bedeutungen, die Simulationsbilder technischen Berechnungen verleihen, hat jedes einzelne Bild teil, ganz unabhängig davon, in welchem lokalen Kontext die Modellierung stattgefunden hat. So füllen die bunten Farben einer Simulationsdarstellung nach außen hin mit den Lücken in dem Gitter auch die Lücken zwischen der komplexen Wirklichkeit und der sie beschreibenden wissenschaftlichen Theorie. Die Simulationsbilder visualisieren mehr als nur die aus mathematischen Modellen gewonnenen Rechenergebnisse. Während die formalen Modelle durch Abstraktion, Abgrenzung und Herauslösung aus der komplexen Realität herausgelöst wurden, fügt das Simulationsbild den Ergebnissen dieser Transformationen wieder etwas hinzu. Dieses Zusätzliche entspricht zwar nicht dem Weggelassenen oder Ausgegrenzten, bietet aber, indem es einen vollständig mit farbigem Wissen durchdrungenen Weltausschnitt präsentiert, eine neue Art von Vollständigkeit an. Diese Rekontextualisierung wird durch die menschliche Wahrnehmung vermittelt und ist damit ein kulturell und sozial geprägter Vorgang.

Das Simulationsbild schwankt auf diese Weise zwischen mehreren Polen. Einerseits stellt es über Elemente der Alltagserfahrung einen starken Realitätsbezug her, andererseits beruft es sich in seiner Kompetenz auf seine Herstellungsweise und seine ästhetischen Qualitäten. Wie sehr es nach einer dieser Richtungen tendiert, kann über den Einsatz der beschriebenen Elemente wie Farbgebung, Hintergrundgestaltung oder Codierungstechnik eingestellt werden. Mir scheint gerade die Kombination von

16 Daß ästhetische und analytische Kategoriein bei der Gestaltung wissenschaftlicher Bilder oft sehr eng zusammenwirken, zeigen Lynch und Edgerton (1988) in ihrer Untersuchung der Bilder von Objekten des Weltalls. Diese werden in eigenen Bildverarbeitungslaboratorien aus den von Detektoren aufgefangenen elektromagnetischen Signalen erzeugt. Lynch und Edgerton schließen aus den Ergebnissen ihrer teilnehmenden Beobachtung in einem solchen Labor, daß ästhetische Kriterien bei der Produktion dieser Bilder von den beteiligten Wissenschaftlern als etwas den wissenschaftlichen Untersuchungen äußerliches behandelt werden. Die Produktion von „pretty pictures“ (z. B. farbige Darstellungen von Sternen) für populärwissenschaftliche Veröffentlichungen wird als unwissenschaftliche Nebentätigkeit angesehen. Bei näherer Analyse des Umgangs der Astronomen mit dem „wissenschaftlichen“, nicht für die Öffentlichkeit bestimmten Bildmaterial zeigt sich jedoch, daß sich ihre Vorstellung von dem Wesen der abgebildeten Entitäten in der Bewertung der Bildqualität wiederfindet. Ein gutes Bild ist somit eines, das in der Sprache des Bildes abstrakte Eigenschaften des Sternes wiedergibt. Die von Lynch und Edgerton (S. 214/15) aufgestellte Vermutung, daß wissenschaftliche Naturbilder heutzutage mit der Bereitstellung idealisierter Naturbilder eine alte Funktion der Künste übernehmen, kann m.E. durchaus auf Simulationsvisualisierungen ausgedehnt werden.

Authentizität und Künstlichkeit dieser Art von Bildern eine hohe Suggestivkraft zu verleihen. Das technische Verfahren ermöglicht mit der gleichzeitigen Abbildung realer Vorgänge mit ihren Ursachen und der Durchdringung vertrauter Alltagsvorgänge mit wissenschaftlicher Spezialtheorie eine ungemein wirkmächtige Kombination von Inhalten. Mit der Hilfe der beschriebenen Visualisierungsstrategien gelingt es, die dem Simulationsbild zugrundeliegende Herstellungsarbeit zum Verschwinden zu bringen, ohne die Autorität des Produkts wissenschaftlicher Berechnung zu verlieren.¹⁷ Die Darstellungsform verleiht den Berechnungen gleichzeitig die Autorität der computergenerierten Exaktheit und die der Nähe zur vertrauten Wirklichkeit.

4.5 Das Simulationsbild als Mobilisator – Von Zusammenzeichnungen und Zusammenziehungen

Die ordnungsstiftende Macht von Simulationsbildern erschöpft sich nicht in ihrer oben beschriebenen rhetorischen Funktion als Repräsentation wissenschaftlicher Ordnungsmacht über konfuse Realität. Vielmehr eröffnen die digitalen Codierungstechniken der modernen Technikwissenschaft auch ganz konkrete Möglichkeiten effektiven Wirkens.

Ein erheblicher Vorzug der computergestützten Visualisierung ist es, daß aus einem einzigen Simulationsdatensatz immer neue Bilder mit immer anderen Skalierungen und Perspektiven erzeugt werden können. Dadurch lassen sich die Bild-Argumente flexibel in verschiedene Zusammenhänge transformieren. Zudem können Simulationsbilder an den unterschiedlichsten Orten mit verschiedenen Computern immer neu generiert werden. Zu der erhöhten Flexibilität kommt damit eine Beschleunigung der Zirkulation visueller Argumente. Fertige Bilder lassen sich dank ihrer digitalen Codierung leicht miteinander vergleichen und mit anderen Bildern kombinieren. Damit besitzen die Visualisierungstechniken der Computersimulation in geradezu beispielhafter Weise die Eigenschaften, die Bruno Latour als kennzeichnend für wirkmächtige „Einschreibungen (Inscriptions)“ nennt.¹⁸ Solche Einschreibungstechniken sind es, die nach Latour den Transformationen wissenschaftlich technischer Weltbeschreibung den letzten Schliff verleihen und damit entscheidend dazu beitragen, die Reichweite und Mobilität wissenschaftlichen Wissens zu steigern. In seinem Aufsatz „Drawing things together“ wendet Latour (1988) das Konzept der Einschreibung auf verschiedene wissenschaftliche Visualisierungsstrategien an. So untersucht er dort z. B. die Linearperspektive und den Buchdruck. Die entscheidende Leistung solcher Repräsentationsformen ist es für ihn, Brücken zwischen Symbolsystemen aus verschiedenen Bereichen zu schlagen. Durch „zeichnende Zusammenziehungen“ wird es seiner Darstellung nach möglich, artfremde Elemente auf neue Art miteinander zu kombinieren. Ressourcen können so verschoben und damit in großem Maßstab mobi-

17 Borck (2001, S. 388) beschreibt in seinem Kommentar zu den verschiedenen in Heintz/Huber (2001) vorgestellten wissenschaftlichen Visualisierungsstrategien dieses „Verschwinden der Technik“ als wesentliches Merkmal und spricht von einem „Paradox der Transparenz“: „Auf der einen Seite sind die Bilder Dokumente eines vielfach gesteigerten Einsatzes von Technik und auf der anderen Seite vermeintliche Abbilder der Natur selbst bzw. einzelner Aspekte von Natur. [...] Es ist, als ließe sich durch die Steigerung der Technik ihr Einsatz überwinden.“

18 Stichwortartig seien die Kriterien hier genannt. Einschreibungen sind nach Latour (1988, S. 44f.): Mobil, stabil, flach, leicht skalierbar, billig reproduzierbar, kombinierbar. Zu Latours Konzeption der Produktion wissenschaftlichen Wissens vgl. auch Abschnitt 1.4.1.

liert werden. Ein Paradebeispiel einer Repräsentationsform, die in dieser Weise eine Plattform für die Vereinigung von Symbolen aus verschiedenen Bereichen bildet, ist für Latour die klassische technische Zeichnung.¹⁹ Aufgrund eines ausgefeilten Symbolsystems kann diese in verschiedenen Zusammenhängen als Grundlage von Mobilisierungen dienen. So bildet ein und dieselbe technische Zeichnung die Grundlage für die Fertigung von Werkstücken, für die Planung der Arbeitsverteilung, der Lagerhaltung und des Einkaufs, sowie für verschiedene ökonomische Kalkulationen. Dies gilt in noch viel stärkerem Maße für die heutigen technischen Zeichnungen, die mit Computerunterstützung erstellt werden und noch vielfältigere Informationen auf sich vereinen. Auch Simulationsbilder vermitteln zwischen verschiedenen Symbolsystemen und können in den unterschiedlichsten Zusammenhängen Aktivitäten veranlassen. In einem einzigen Simulationsbild können nicht nur mehrere Bildebenen, wie etwa eine Landkarte und ein Temperaturverlauf, sondern auch mehrere Informationsebenen aus unterschiedlichen Bereichen überlagert sein. Die bildlichen Darstellungen können beliebig mit Textelementen kombiniert werden, was insbesondere für die Publikation „simulierter“ Forschungsergebnisse eine Vielzahl neuer Möglichkeiten eröffnet. Der durch die Übersetzungstechniken strukturierbare Computerbildschirm stellt für die unterschiedlichsten Arten von Aussagen einen optisch konsistenten Darstellungsraum zur Verfügung. Dabei können unterschiedslos zu den errechneten Ergebnissen auch völlig fiktive Elemente abgebildet sein. Auch diese Möglichkeit zur Darstellung hybrider Objektkombinationen beschreibt Latour als typisch für eine mächtige Einschreibungstechnik. So bemerkt er für die Linearperspektive:

„Perspective is not interesting because it provides realistic pictures; on the other hand, it is interesting because it creates complete hybrids: nature seen as fiction, and fiction seen as nature, with all the elements made so homogenous in space that it is now possible to reshuffle them like a pack of cards.“ (Latour 1988, S. 29).

An anderer Stelle schreibt Latour, mit Bezug auf weitere Einschreibungstechniken:

„a new meeting place is designed for fact and fiction, words and images“ (ebd., S.31).

Noch direkter und vielfältiger als die klassische Technische Zeichnung können Simulationsvisualisierungen Umordnungen materieller und sozialer Strukturen anleiten. So können diese Bilder innerhalb sogenannter CIM (Computer Integrated Manufacturing) Systeme direkt für die Fertigung von Artefakten eingesetzt werden.²⁰ In diesem Fall wird auf die Ebene der exakten Zahlenwerte zugegriffen, die in jeder „bunten“ Simulationsgraphik verfügbar bleibt. Auf der Basis wieder anderer Informationen, die ein Simulationsexperiment liefert (z. B. über den Energieverbrauch oder den notwendigen Werkstoffeinsatz) können auch ökonomische Kalkulationen angestellt und Verkaufsstrategien entwickelt werden. Gleichzeitig dienen Simulationsgraphiken, wie schon beschrieben wurde, als Argumente in verschiedenen Kontroversen und können somit Unterstützung für bestimmte Positionen mobilisieren. Simulationsbilder werden von Ingenieurinnen und Technikern zur Entwicklung konkreter Technologien und

19 Latour (1988, S. 53): „Industrial drawing does not only create a paper world that can be manipulated as if in three dimensions. It also creates a common place for many other inscriptions to come together.“

20 Die Möglichkeit, eine Datei mit den Daten eines Werkstücks, das aus Simulationsrechnungen hervorgegangen ist, direkt an eine computergesteuerte Werkzeugmaschine zur Fertigung weiterzuleiten, ist allerdings bislang weitgehend eine unerfüllte Idealvorstellung des CIM.

von anderen Akteuren zur Unterstützung von Entscheidungen herangezogen. Damit tragen sie zu der Materialisierung des von ihnen transportierten Weltbildes selber bei. So wird der Einsatz der oben beschriebenen Stilelemente zur Stärkung eines bestimmten Argumentes im Erfolgsfalle nicht nur dazu führen, daß der vertretene Forschungsansatz bevorzugt weiterverfolgt wird, sondern auch, daß sich technische Lösungen durchsetzen, die gerade auf den Phänomenen beruhen, die diese Forschungsrichtung sichtbar macht.²¹

4.6 Die Auswertung von Simulationsvisualisierung - Eine Sache für Expertinnen?

In den vorangegangenen Abschnitten wurde das Augenmerk auf die Herstellung von Simulationsbildern und ihre Aufladung mit zusätzlichen Bedeutungen gerichtet. Die so entstandenen Bilder werden jedoch in verschiedenen Kontexten rezipiert und interpretiert. Die dabei gewonnenen Informationen werden in verschiedenen Zusammenhängen weiterverarbeitet. Um daher die Wirkungsweise von Simulationsbildern zu verstehen, muß auch ihre Auswertung in den Blick genommen werden. Zunächst werden hier einige allgemeine Aspekte der Interpretation von Simulationsbildern diskutiert, um dann auf die Frage nach der Bedeutung solcher Bildinterpretation für ingenieurwissenschaftliche Wissensgenerierung zu kommen.

4.6.1 Voraussetzungen für Entschlüsselungen

Um einer Simulationsvisualisierung gezielt bestimmte Informationen zu entnehmen, bedarf es einer Kenntnis der für diese Information angewandten Übersetzungsregeln. Daher sind die Möglichkeiten der Auswertung einer solchen Abbildung dadurch bestimmt, welche Decodierungshilfen²² zur Verfügung stehen. Die qualitative Interpretation durch den Augenschein wird über die Decodierungsanleitung erheblich in ihrer Richtung beeinflusst. Dies gilt nicht nur für diejenigen Decodierungshilfen, die mit fertig bearbeiteten, an eine Öffentlichkeit von Expertinnen oder Laien gerichteten Simulationsgraphiken abgebildet sind, sondern auch für solche, die einem Anwender der Software auf dem Bildschirm des Computers dargeboten werden. Dennoch besteht hier ein entscheidender Unterschied: Am Computer kann – z. B. durch Klicken mit der Maus auf einen Punkt der Graphik – der exakte Zahlenwert für das Rechenergebnis und die Lage des Punktes im Originalsystem an dieser Stelle abgerufen werden. Dies ist einer Betrachterin einer aus dem Programm herausgelösten Graphik nicht mehr möglich. Im Gegensatz zur Simulationsgraphik „in Bearbeitung“ hat also schon eine Schließung stattgefunden. Die Interpretationsoffenheit hat sich durch die Transformation der Daten in Bilder nicht erhöht, sondern verringert.²³ Auf diese Weise gewinnen wissenschaftliche Präsentationen mit Simulationsbildern an Anschaulichkeit, ohne daß damit automatisch ein kritischer Umgang mit ihnen erleichtert wird.

Um zudem mehr mit einem Simulationsbild anfangen zu können, als es in einer vorgegebenen Richtung zur Kenntnis zu nehmen, ist zusätzliches Wissen erforderlich,

21 Innerhalb dieser „Realisierungen“ von Weltbildern im Zuge der simulationsbasierten Technikentwicklung sind die Visualisierungen nur ein Bestandteil. Vgl. hierzu Abschnitt 1.4.1.

22 Vgl. den Abschnitt „Die Decodierungshilfen“ auf Seite 197.

23 Zu der Interpretation der Visualisierung wissenschaftlicher Forschungsergebnisse als Schließungsprozeß vgl. Friese/Wagner (1997).

das auch die Decodierungshilfen nicht liefern können. Dazu gehört Wissen über das mathematische Modell, das der Simulation zugrundeliegt. Zur Bewertung eines Simulationsbildes muß bedacht werden, welche Annahmen, Approximationen und Idealisierungen in diesem Modell enthalten sind, denn daraus folgt, welche Aussagen das Bild überhaupt nur machen kann. Dazu ist ein gewisses Maß an Fachwissen in dem jeweiligen Forschungsgebiet unabdingbar. Weiterhin ist aber auch für eine wirklich bedeutungsvolle Bildinterpretation eine genaue Kenntnis der Verfahren nötig, die bei der Erstellung des Gitters und der numerischen Berechnung angewandt wurden. Ein anders strukturiertes Gitter oder ein anderer numerischer Algorithmus haben ein vollkommen anderes Aussehen des Bildes zur Folge, da an anderen Stellen Informationen berechnet werden. Die visuelle Komponente, die das Auswerten von Simulationsbildern enthält, ist also zwar vorhanden, aber keineswegs besonders dominant. Entscheidend für die erfolgreiche Auswertung ist vielmehr praktisches und theoretisches Wissen in verschiedenen Bereichen. Die bloße Betrachtung des Bildes alleine reicht für seine bedeutungsvolle Interpretation nicht aus. Bevor die Bilder zu der Realität in einem Verhältnis stehen, das es ermöglicht, relevante Aussagen aus ihnen abzuleiten, ist ein langwieriger Prozeß des gegenseitigen Abgleichs notwendig. Dies wird meiner Ansicht nach übersehen, wenn lediglich das Ende dieses Vorganges, also die fertige Simulation, betrachtet wird, um daraus einen neuen Stellenwert visueller Analysemethoden in der Wissenschaft abzuleiten, wie es etwa in dem folgenden Statement geschieht:

„It is worth remarking that with the easy transition between propositional representations and graphical representations that is a characteristic of computational methods, the traditional emphasis upon propositional representations of the comparison between theory and data is seen to be unnecessary.“ Humphreys (1995/96, S. 128)

Angeichts der vorangegangenen Ausführungen kann festgestellt werden, daß die Übertragung propositionaler in graphische Repräsentationen – bei aller Schnelligkeit, mit der sie dann letztendlich im Computer geschieht – keinesfalls als einfach bezeichnet werden kann. Außerdem verlieren die propositionalen Formulierungen in dem Vergleich von Theorie und Daten dabei keineswegs an Gewicht. Vielmehr ist die Erzeugung eines Simulationsbildes ein Transformationsprozeß, dessen einzelne Schritte auf hochgradig propositionalem Wissen beruhen. Zwar mag es einem außenstehenden Betrachter realistischer Simulationsvisualisierungen so scheinen, als schrumpfe der Unterschied zwischen einem realen und einem simulierten Experiment immer mehr zusammen²⁴, so daß die für die Ergebnisse moderner Wissenschaft existenzielle glaubwürdige Zeugenschaft in einiger Hinsicht durch Simulation erzeugt werden kann. Für die wissenschaftlich bedeutungsvolle Auswertung bestehen jedoch nach wie vor erhebliche Unterschiede in den zu leistenden Übersetzungen.

24 Dies beschreibt z. B. Rohrlich (1990, S. 511) im Zusammenhang mit der Darstellung einer Simulation atomarer Vorgänge in einem Bearbeitungs-Werkzeug: „There is clearly a tendency to forget that these figures are the result of a computer simulation, of a calculation; they are not photographs of a material physical model. But one certainly seems to be participating in an experiment rather than in a purely theoretical study“.

4.6.2 Interpretation von Simulationsvisualisierung - Eine Renaissance bildlichen Denkens in der Technikentwicklung?

Im vorigen Abschnitt wurde gezeigt, daß eine visuelle Auswertung von Simulationsbildern nicht ohne den Einsatz zusätzlichen theoretischen Wissens geschehen kann. Dennoch ist es offensichtlich, daß mit der zunehmenden Bedeutung von Computersimulation als Methode technikwissenschaftlicher Wissensgenerierung und der damit verbundenen Notwendigkeit der Auswertung von Simulationsvisualisierungen eine neue visuelle Komponente in das ingenieurwissenschaftliche Denken hineingetragen wird. So kann davon ausgegangen werden, daß sich bei erfahrenen Simulationsanwenderinnen ein intuitives Wissen um die Auswertung von Simulationsergebnissen ausbildet. Darin spielen visuelle Fähigkeiten zwangsläufig eine Rolle. Ingenieure, die Erfahrung mit dem Simulationsprogramm und dem Fachgebiet haben und schon viele Simulationsbilder ausgewertet haben, „sehen“ einem Simulationsbild an, ob etwas damit nicht stimmt, ohne lange Rückübersetzungen in propositionale Formulierungen vornehmen zu müssen. Es ist nun die Frage, ob solche Sehensleistungen als neue Ausprägung einer genuin ingenieurwissenschaftlichen Imaginationsfähigkeit verstanden werden können.

Die These, daß ingenieurwissenschaftliches Denken in hohem Maße ein Denken in Bildern sei, kann weitreichende Implikationen haben. Dies zeigt sich bei einem ihrer nachdrücklichsten Vertreter, Eugene S. Ferguson. In seinem viel zitierten Werk „Engineering and the Mind’s Eye“²⁵ vertritt Ferguson die Ansicht, die innere Vorstellungskraft (Mind’s Eye) von Ingenieuren sei der entscheidende Träger erfolgreicher Technikentwicklung. Wesentliche Komponenten dieser Fähigkeit seien eine tiefere Ein-Sicht in die verarbeitete Materie und die Komplexität der Realität. Diese könnten nur durch langjährige konkrete nicht nur visuelle, sondern auch taktile Erfahrung mit technischer Praxis und nicht allein durch theoretische Ausbildung erworben werden. Diese Fähigkeiten sind nach Ferguson persönlich gebunden und nicht explizierbar. Ferguson schätzt den naturwissenschaftlichen Anteil ingenieurwissenschaftlichen Tuns als eher gering ein und bezeichnet die Ingenieurstätigkeit als eine Kunst (ebd. S. 33). Aus dieser Einschätzung leitet er entsprechende Forderungen an die ingenieurwissenschaftliche Ausbildung ab. Hier ist nicht der Ort, diese Folgerungen zu diskutieren. Stattdessen soll genauer untersucht werden, welche Eigenschaften Ferguson dem ingenieurwissenschaftlichen Sehen zuschreibt, um diese mit der Auswertung von Simulationsbildern vergleichen zu können. Ferguson nennt folgende Fälle für das Wirken visueller Fähigkeiten bei der Entwicklung von Technik:

- Die Fähigkeit, sich die Funktion eines technischen Gerätes im Geiste vorzustellen, bevor es konkret existiert (S. 15 ff. und S. 53 ff.).
- Die Notwendigkeit, durch Anschauung der Praxis von Technikentwicklung ein Gefühl für Material und seine Verarbeitung zu erwerben (S. 62 ff.).
- Die Vermittlung und Verbreitung technischer Informationen über Bilder (S. 80 ff. und S. 115 ff.). Ferguson führt dabei zum Einen die technische Zeichnung mit ihrer graphischen Symbolsprache an und postuliert, die Übung erfahrener Ingenieure in dieser Zeichentechnik führe zu einem Sinn für Proportion, Form und Zweckmäßigkeit von Konstruktionen, der für die Praxis unerlässlich sei. Zum Anderen nennt

25 Deutsch: „Das innere Auge: Von der Kunst des Ingenieurs“. Ferguson (1993)

er die Übermittlung technischen Wissens durch Skizzenbücher, bebilderte Lehrfilmen technischer Standardlösungen und mechanische Modelle.

- Die Verwendung visueller Elemente beim ingenieurwissenschaftlichen Rechnen. Beispielhaftes Instrument des visuellen Rechnens ist für Ferguson der Rechenschieber (S. 146), dessen Einsatz bis in die 60er Jahre hinein geradezu ein Kennzeichen des Ingenieurs war. Im Gegensatz zu dem Taschenrechner, der ihn ablöste, erforderte er eine visuelle Kontrolle der Größenordnung des Ergebnisses.
- Den Einsatz graphischer Verfahren bei der Analyse technischer Probleme (S. 56 ff. und 143 ff.). Solche Verfahren wie z. B. die graphische Statik, in der Kräfte durch Pfeile repräsentiert und graphisch addiert werden, waren bis zur Verbreitung des Computers unerläßliches Hilfsmittel in allen Ingenieurwissenschaften.

Diese Aufzählung der von Ferguson aufgeführten Aspekte ingenieurwissenschaftlichen Sehens zeigt, daß in seiner Verwendung von „Sehen“ immer zwei Konnotationen mitschwingen. Einerseits geht es ganz konkret um den Einsatz des Auges bei der Generierung und Anwendung von Wissen. Andererseits ist ein intuitives Erfassen des Funktionierens von Welt gemeint. Ein solches Gefühl für die Dinge führt dazu, daß der erfahrene Ingenieur ohne zu rechnen „sieht“, welche Lösung für ein Problem angemessen ist. Ein solches Sehen dient für Ferguson als Korrektiv für die theoretische Analyse, die der Komplexität der Wirklichkeit nie ganz gerecht werden kann. Diese beiden Aspekte verschmelzen in Fergusons Beispielen, da der Einsatz des Auges für Ferguson Erfahrung und Einfühlung in die Sache immer mitbedingt. Dagegen liefert die theoretische Analyse zunächst Ergebnisse, die nicht unbedingt an der Welt geschult sind.

Dieser Zusammenhang ist, wenn er denn jemals in dieser Eindeutigkeit bestanden haben sollte, meiner Ansicht nach mit der visuellen Analyse der Simulationsvisualisierungen aufgebrochen. Äußeres Auge und geistiges Auge fallen hier auseinander. Sicherlich ist die Fähigkeit, Simulationsbilder zu interpretieren, eine Tätigkeit, bei der das Sehen mit dem Auge unerläßlich ist. Das visuelle Element liefert jedoch kein Gegengewicht zu der theoretischen Analyse, da es ja gerade deren Ergebnisse sind, die „visualisiert“ werden. Die visuelle Analyse (nicht die gesamte sinnhafte Interpretation s.o.!) ist damit von einer Einfühlung in die behandelte Materie unabhängig. Im Gegenteil ist für die Simulation, was den Gegenstand der Analyse – den behandelten Weltausschnitt – betrifft, ein höheres Maß an theoretischer Durchdringung als je zuvor nötig. Dies kommt daher, daß es für die Modellierung notwendig ist, alle Aspekte des zu simulierenden Systems explizit zu analysieren und mathematisch zu fassen. Dabei fällt, wie in Kapitel 3 an mehreren Stellen gezeigt werden konnte, solches ingenieurwissenschaftliches Wissen, das in Fergusons Sinne visuell orientiert ist, häufig gerade aus dem Prozeß der Wissensgewinnung heraus. Bei den klassischen graphischen Methoden der Ingenieurwissenschaften stehen Bild und Theorie in einem anderen Verhältnis als bei der Simulation. Auch in diesen Bildern werden abstrakte Größen der physikalischen Theorie (Kräfte, Momente etc.) durch graphische Symbole repräsentiert. Auch hier spiegeln sich Ortsveränderungen in der Realität als Ortsveränderungen auf dem Papier wieder (Durchbiegung von Balken). Die visuelle Technik ist bei diesen Verfahren jedoch stets unmittelbar mit der Behandlung des Gegenstandes verknüpft. Die Analyse des Problems selbst und nicht die Darstellung des Ergebnisses einer solchen Analyse geschieht mit Hilfe des graphischen Verfahrens. Daher

ist das Bild dort nie der letzte Schritt der Transformationen, sondern häufig einer der ersten, während der Zahlenwert als Ergebnis des graphischen Verfahrens am Ende steht. Bilder aus solchen Verfahren sind für uneingeweihte Personen in der Regel vollkommen unverständlich. Die Anschaulichkeit wird zu Beginn aus einer Sachkenntnis heraus gewonnen. Für diese Verfahren ist daher Fergusons Bewertung, visuelle Methoden seien ein Instrument der Analyse, nachvollziehbar.

Im Gegensatz dazu produzieren die Daten-Transformationen der Visualisierungstechniken *im Anschluß* an die eigentliche Problembehandlung vordergründig eine Anschaulichkeit, die von den physikalischen Zusammenhängen, aber auch von einem Erfahrungswissen in dem Fachgebiet unabhängig ist. So ist die Computergraphik eines Strömungsvorgangs bei einer Kenntnis der zugehörigen Übersetzungsregeln leicht zu verstehen, die zugrundeliegenden Differentialgleichungen jedoch und erst recht die Einzelheiten des numerischen Lösungsverfahrens sind kaum zu überblicken. Die leichte Zugänglichkeit der vordergründigen Aussage des Bildes steht in krassem Gegensatz zu der Schwierigkeit seiner kritischen Interpretation.²⁶ Die nach Ferguson dem Ingenieur eigene Urteilsfähigkeit („Engineering Judgement“) ist somit zwar auch für die simulationsunterstützte Technikentwicklung existenziell, läßt sich aber nicht an das visuelle Moment der Analyse knüpfen. In der Praxis der Auswertung von Simulationsgraphiken, in der die einzelnen Funktionen (Modellierung, Gittererzeugung, numerische Lösung, Auswertung) oft getrennt sind und auch bei der Interpretation durch Laien kann es aber durchaus der Fall sein, daß rein visuelle Auswertungen vorgenommen werden. In Bezug auf eine solche visuelle Auswertung von Simulationsbildern, die abgekoppelt von einer theoretischen Durchdringung stattfindet, kann vermutet werden, daß die leichter eingängige Überprüfung mit dem äußeren Auge das „geistige Auge“ (Fergusons „Minds Eye“) weniger beansprucht. Die sinnvolle Interpretation von Simulationsbildern erfordert jedoch, wie oben beschrieben, eine Auseinandersetzung mit hochabstrakter Theorie aus verschiedenen Bereichen. Losgelöst davon bleibt als charakteristisches Merkmal dieser wissenschaftlichen Bildverwendung nur die Anschaulichkeit nach außen bestehen.

4.7 Differenzen und Parallelen zu anderen technisch wissenschaftlichen Bildgattungen

In dem vorangegangenen Abschnitt ist deutlich geworden, daß die Bilder, um die es hier geht, in mehrfachem Sinne als theoriegeladene Darstellungen, die ihren Gegenstand neu konstituieren, aufgefaßt werden können. Die Bilderzeugungsverfahren der Simulationstechniken müssen damit – wie alle wissenschaftlichen Visualisierungstechniken – als politisch in ihrem Charakter verstanden werden. Dies gilt, wie gezeigt wurde, nicht nur in dem engeren Sinne, daß sie in politischen Kontroversen als Argumente dienen, sondern vor allem insofern, als mit ihrer Hilfe ein Repräsentationssystem etabliert wird, das bestimmte Akteure ermächtigt, für andere zu sprechen, die sich dann nicht mehr auf andere Weise artikulieren sollen.²⁷ Der in diesem Sinne poli-

26 Dieser Effekt wird häufig für fehlerhafte Konstruktionen verantwortlich gemacht. So warnt etwa Fröhlich (1995) im Zusammenhang mit dem Einsatz der Methode der finiten Elemente: „Die größte Gefahr der Fehleinschätzung geht von psychologischer Seite aus: Die mit Hilfe des Computers dargestellten Ergebnisse sind heute so hervorragend aufbereitet, daß es schwerfällt an Fehler zu denken. Selbst die mit diesem Medium umgehenden Ingenieure erliegen oft der Faszination der bunten Bilder.“ (S. 50).

27 Zum politischen Charakter visueller wissenschaftlicher Repräsentation vgl. Law/Whittaker (1988).

tische Charakter visuell vermittelter wissenschaftlicher Weltbilder ist jedoch weder ein Phänomen, das erst seit dem Auftauchen computergenerierter Bilder besteht, noch ist es innerhalb moderner Naturwissenschaft auf Bilder aus Computersimulationen beschränkt. Vielmehr kann jede der Bildgattungen, die bei der Generierung wissenschaftlich technischen Wissens eingesetzt werden, in einen Zusammenhang mit seinem kulturellen und gesellschaftlichen Kontext gestellt werden. Als sich im Zuge der „pragmatischen Wende“ die Aufmerksamkeit der Wissenschafts- und Technikforschung den konkreten Techniken der Wissensgenerierung zuwandte, kam daher bald auch die Rolle bildlicher Darstellungen in der wissenschaftlichen Praxis in den Blick. So existieren denn auch mittlerweile zahlreiche Untersuchungen, in denen aus kulturwissenschaftlicher, sozialwissenschaftlicher oder wissenschaftstheoretischer Perspektive versucht wird, diesen Zusammenhang für bestimmte wissenschaftlich technische Bildgattungen zu beschreiben. In dem nächsten Abschnitt werden einige dieser Untersuchungen herangezogen, um die Simulationsvisualisierung in einen breiteren Kontext wissenschaftlich technischer Bildproduktion einordnen zu können.

4.7.1 Technisch unterstütztes Sehen

Bei der Beobachtung von Natur mit technischen Hilfsmitteln steht wie bei der Produktion von Simulationsbildern eine Repräsentationstechnologie zwischen Objekt und Bild. Wie dieses Verhältnis zwischen Bildern, repräsentierten Objekten und Visualisierungstechnologie genau zu fassen sei, ist Gegenstand einer wissenschaftstheoretischen Debatte, die hier nicht aufgerollt werden soll. Stattdessen wird ein Vergleich mit einem konkreten Verfahren technisch unterstützten Sehens – dem Mikroskop – angestellt. Ähnlich wie bei der Betrachtung einer Simulationsabbildung eröffnen sich bei einem Blick durch ein Mikroskop neue, für das bloße Auge unsichtbare Welten. Mikroskopische Anblicke von „Natur“ sind künstlich mit Hilfe von Präparationstechniken und technischen Verfahren zur Sichtbarmachung von Unterschieden in Struktur oder Konsistenz innerhalb präparierter Objekte erzeugt. Die gewonnenen Bilder sind daher abhängig von naturwissenschaftlicher Theoriebildung.

Ian Hacking²⁸ kommt in seiner ausführlichen Analyse verschiedener Mikroskopietechniken zu dem Schluß, daß von einem „Sehen“ durch das Mikroskop gesprochen werden kann, wenn das Konzept des Sehens dahingehend erweitert wird, daß die Betrachtung einer Karte von physikalischen Interaktionen zwischen Objekt und Bild mit darunter gefaßt wird. Hacking argumentiert, daß Mikroskopbilder nicht als theoriegeladene Bilder bezeichnet werden können, da der Glaube an ihre Wahrheit mit praktischen Mitteln, wie etwa durch Vergleich von Bildern, die mit vollkommen unterschiedlichen Mikroskopie-Verfahren erzeugt wurden, oder durch die Betrachtung von künstlich hergestellten Referenzobjekten, erzeugt wird. Physikalische Theorie – etwa über die bildgenerierende Strahlung – ist nach Hacking zwar nötig, um Mikroskope zu bauen, aber nicht, um sie zu verwenden. Eine Theorie über das Objekt selbst ist nach ihm erst für ein weitergehendes Verständnis, nicht jedoch für das reine Sehen (im oben beschriebenen Sinne) involviert.²⁹ Eine generelle Aufgeladenheit mikroskopischer Bilder mit wissenschaftlicher Theorie weist Hacking also zurück.

28 Hacking (1983, S. 186-209).

29 Hacking weist aber darauf hin, daß damit, daß mikroskopische Objekte mit zu den beobachtbaren Entitäten gezählt werden können, noch nichts über ihre tatsächliche Existenz ausgesagt ist.

Wie stellt sich nun demgegenüber das Sehen von „Natur“ auf einem Simulationsbild dar?

Selbst wenn man Hackings eher vorsichtiger Definition von Theoriegeladenheit folgt, fällt es schnell ins Auge, daß für Simulationsbilder nicht analog argumentiert werden kann. Im Gegensatz zur Mikroskopie besteht bei der Simulation vom Objekt zum Bild keine geschlossene Kette physikalischer Interaktionen. Dies gilt auch dann, wenn man die im Computer ablaufenden Algorithmen auf die physikalischen Interaktionen, auf denen sie letztlich beruhen, zurückführt. Zwar wird das Aussehen einer Simulationsgraphik auch wesentlich von solchen Theorien des Herstellungsverfahrens geprägt, die von dem Objekt der Darstellung prinzipiell unabhängig sind (so z. B. Theorien der numerischen Mathematik, der Informatik oder des Informationsdesigns), was in Analogie zu der Mikroskopie-Theorie gesehen werden kann.

Der entscheidende Aspekt der Theoriegeladenheit hat jedoch einen anderen Charakter. Die Repräsentationen der Simulation nämlich sind aus einem Modell abgeleitet, das wiederum zum Teil aus naturwissenschaftlicher Theorie, die das System selbst betrifft, hergeleitet ist. Bei einer Simulation ist das abgebildete Original-System daher im Gegensatz zu einem technischen Verfahren zur Sichtbarmachung von Weltausschnitten wie der Mikroskopie, die ja der Anwesenheit der Probe bedarf, in keiner Weise beteiligt. Es geht also nicht wie bei der Mikroskopie primär darum, daß physikalische Entitäten und deren Verhalten in einem technischen Verfahren, das auf einer von diesen unabhängigen Theorie beruht, sichtbar gemacht werden. Stattdessen werden technologisch Repräsentationen *zu* einer naturwissenschaftlichen Theorie erzeugt. Das Betrachten einer Simulationsgraphik kann also selbst in Hackings Sinne nicht unter „Sehen“ von Natur gefaßt werden. Andererseits muß man sich, wenn man dieses Argument im Sinne eines Einwandes gegen den Realismus von Simulationsbildern verwendet, Hackings Vorwurf gefallen lassen, mit einer theoriedominierten Philosophie an naturwissenschaftlich-technische Praxis heranzugehen. Denn im praktischen Umgang mit Simulationsabbildungen wird das Vertrauen in deren Aussagekraft ebenso wie bei der Mikroskopie mit empirischen Methoden erzeugt und beruht nicht auf einer reinen Betrachtung von Bildern. Damit wird die „Kette physikalischer Interaktionen“, die durch die theoretische Modellierung unterbrochen ist, sozusagen hintenherum wieder geschlossen. Damit wird aber das Verhältnis zwischen dem Objekt und seiner Repräsentation als beidseitig gerichteter technischer Produktionsprozeß³⁰ beschreibbar. Die Repräsentation ist dabei keine Abbildung des Endproduktes eines Erkenntnisprozesses sondern ein unverzichtbares Instrument zur Gewinnung von Erkenntnissen über die repräsentierten Objekte. Die Zurückweisung des Anspruchs der Simulationsgraphik auf neutrale Sichtbarmachung entdeckter natürlicher Strukturen bedeutet daher keineswegs eine Negierung ihrer Wirksamkeit bei der wissenschaftlichen Produktion stabiler Phänomene.

Innerhalb moderner Natur- und Technikwissenschaft übernehmen unzählige verschiedene technisch unterstützte Visualisierungsformen tragende Funktionen bei der Generierung von Wissen.³¹ Alle diese Bilder gewinnen ihre Glaubwürdigkeit aus einer Verankerung in ihrem kulturellen und sozialen Kontext und können, wie es hier für die Simulationsvisualisierung geschehen ist, als „Weltbilder“ konzeptualisiert

30 Vgl. Lynch/Woolgar (1988, S. 7).

werden. Wie der Vergleich zwischen den durch die Mikroskopie und die Computersimulation vermittelten Einblicken in das Innere der Welt gezeigt hat, sind die Wege, auf denen technische Bilder zu Weltbildern werden, sehr verschieden. An dem einen Ende stehen solche Bilder, die durch technische Beobachtungsinstrumente wie das Mikroskop geliefert werden. Ihre Glaubwürdigkeit beruht darauf, daß eine lückenlose Kette physikalischer Interaktionen zwischen dem Beobachtungsobjekt und dem Bild angenommen wird. An dem anderen Ende findet sich die hier untersuchte Simulationsvisualisierung, bei der mit der Modellierung eine formale Analyse an erster Stelle in der Reihe der Transformationen steht. Zwischen diesen beiden Wirkungsweisen von Bildern bei der Objektivierung wissenschaftlicher Erkenntnisse gibt es zahlreiche Mischformen, bei denen Laborgeräte als neutrale Protokollanten, formale Algorithmen der Datentransformation sowie die verschiedensten Techniken der Sichtbarmachung in unterschiedlicher Art und Weise mit dem glaubwürdigen menschlichen Interpretieren zusammenwirken.

4.7.2 Die wissenschaftliche Illustration

Nachdem im vorigen Abschnitt gezeigt wurde, daß die Produktion von Simulationsbildern nur bedingt mit solchen wissenschaftlichen Bildern verglichen werden kann, die direkt von technischen Geräten erzeugt werden, soll nun über einen Vergleich mit der wissenschaftlichen Illustration ein Vorstoß in eine andere Richtung unternommen werden. Wissenschaftliche Illustrationen sind Bestandteile eines Textes, der eine bestimmte wissenschaftliche Aussage nach außen vertreten soll. Dabei kann es sich durchaus um Bilder handeln, die in der wissenschaftlichen Forschungspraxis eine elementare Rolle bei der Wissensgenerierung spielen. Da Simulationsbilder in zahlreichen Veröffentlichungen zu den unterschiedlichsten Themenbereichen die Ergebnisse wissenschaftlicher Forschung nach außen und nach innen vermitteln, scheint es berechtigt, sie zumindest in einigen Aspekten als wissenschaftliche Illustrationen aufzufassen.

Wissenschaftliche Illustrationen transportieren ebenso wie die Texte spezifische Auffassungen über ihren Gegenstand. Wird von einer Theoriegeladenheit wissenschaftlicher Illustrationen gesprochen, so geht es meistens darum, daß diese Auffassungen an ihren gesellschaftlichen Kontext rückgebunden werden.³² Allerdings kann nicht von einem einheitlichen Zusammenhang zwischen soziokulturellem Kontext und Bildproduktion ausgegangen werden. So können innerhalb einer bestimmten Gesellschaftsform gleichzeitig verschiedene wissenschaftliche Visualisierungsstrategien existieren, bei denen das Verhältnis zwischen Illustration, Visualisierung und tatsächlicher Vorstellung der beteiligten Wissenschaftler ganz unterschiedlich beschaffen ist. Dies zeigt besonders eindrücklich Martin Kemp (1996) in seiner vergleichenden Untersu-

31 Vgl. etwa die von Bettina Heintz und Jörg Huber (2001) zusammengestellten „Werkstattberichte“, in denen Vertreter verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen ihre Visualisierungsstrategien vorstellen. In Shapin/Schaffer (1985) findet sich eine historische Untersuchung der Rolle von bildlichen Darstellungen bei der Durchsetzung der experimentellen Methode als zentraler Strategie wissenschaftlicher Erkenntnisproduktion. Shapin und Schaffer bezeichnen neben materiellen und sozialen die „literarischen Techniken“ als wichtige Objektivierungsressource der experimentellen Methode. Darunter fassen sie die Herstellung naturalistischer Abbildungen des experimentellen Instrumentariums aber auch die akribische Festlegung der Beschreibungsweise von Experimenten.

32 Einen Überblick über die Literatur zur Theoriegeladenheit wissenschaftlicher Illustrationen gibt Topper (1996).

chung von wissenschaftlichen Illustrationen der Renaissance in Astronomie und Anatomie. Kemp demonstriert, welche unterschiedlichen Funktionen Visualisierungen in den beiden Wissenschaftsgebieten einnehmen, obwohl beide sich in ihrer Argumentation auf die Elemente der Renaissance-Ästhetik wie Harmonie, Symmetrie und Zweckmäßigkeit der Formen berufen und in ihren Texten ähnliche Metaphern verwenden.³³ Jeder der beiden Visualisierungsstrategien wird von Kemp eine eigene „Rhetorik“ zugesprochen. Da ich im Anschluß an diesen Ansatz versuchen möchte, die „Simulationsrhetorik“ näher zu klassifizieren, werde ich an dieser Stelle ausführlich auf die Ausführungen von Kemp eingehen.

In den Illustrationen der Anatomie wurden die neuen Möglichkeiten der perspektivischen Darstellung dazu eingesetzt, mit den Abbildungen von auseinandergeschnittenen menschlichen Körpern einen Eindruck von Authentizität zu erwecken. Die Bilder sollten zeigen, was der Betrachter, wäre er ein Augenzeuge einer Körperzerlegung, selbst sehen würde (Kemp spricht von „visual pointing“³⁴). Häufig werden die Werkzeuge des Anatomen mitabgebildet, um den Eindruck des gerade ablaufenden Geschehens zu verstärken. Der Text untermauert diesen Anspruch der neutralen Zeugnenschaft, indem er das Verfahren der Sektion genau beschreibt. Kemp bezeichnet einen solchen Einsatz von visuellen Mitteln als „Wirklichkeitsrhetorik“ (rhetoric of the reality³⁵). Er betont, daß es sich bei der Herausbildung dieser Art von Bildrhetorik in der Anatomie um eine bewußte Neuformierung des Gegenstandes und seiner Präsentationsweise handelte und zeigt, daß sich die beteiligten Anatomen sehr wohl über die Problematik der Abhängigkeit der Bildaussage von der Darstellungsweise und den verwendeten Konventionen im Klaren waren.

Für die Astronomie dagegen war es Kemp zufolge nicht so einfach möglich, eine solche Realitätsrhetorik auszubilden.³⁶ Die reine Beobachtung des Himmels mit dem Auge liefert zunächst keine Strukturinformationen. Das Auge ist nur ein Teil des gesamten Instrumentariums der Vermessung und Berechnung, das bei der Erstellung von Himmelskarten eingesetzt wird. Über lange Zeit wurden daher in der Astronomie trotz der allgemeinen Weiterentwicklungen in der Darstellungstechnik weiterhin die alten abstrakten Darstellungsweisen für die Himmelsmechanik eingesetzt.³⁷ Diese beinhalteten zahlreiche mathematische Transformationen einer Vielzahl von systematischen Einzelbeobachtungen. Sie enthielten daher auch immer explizite Theorieelemente wie berechnete Bahnen oder deren Scheitelpunkte. Dabei wurde jedoch versucht, die Wahrheit der Abbildung durch eine hohe Präzision in der Darstellung der Berechnungen und Konstruktionen zu unterstreichen. Kemp spricht daher für diese Abbildungen von einer „Rhetorik der unanfechtbaren Genauigkeit“ (rhetoric of the irrefutable precision³⁸). Trotz des Versuchs, diese Bilder über die exakten mathematischen Kalkulationen als unangreifbar zu präsentieren, haftete ihnen nach Kemp stets etwas modellhaftes an, so daß sich die Möglichkeit anderer Hypothesen mit anderen Berechnungsergebnissen bei der Betrachtung der Bilder geradezu aufdrängte. Ein weiteres Problem, mit dem sich die astronomischen Darstellungen auseinander-

33 Vgl. Kemp (1996, S. 65).

34 Ebd. S. 83.

35 Ebd. S. 43.

36 Vgl. ebd. S. 43 f.

37 Vgl. ebd. S. 66.

38 Ebd. S. 44.

setzen mußten, war die Relativierung des Beobachterstandpunktes durch dessen Eigenbewegung. Diese machte es zunächst unmöglich, das Bild des Himmels aus einer so einheitlichen Perspektive wie die Anatomen ihre Körper darzustellen.

Die Unterschiede zwischen den Repräsentationsstrategien der beiden Wissenschaften sind nach Kemp einerseits durch den Gegenstand, andererseits aber auch durch die Verschiedenheit der technischen Hilfsmittel bedingt. So tauchten auch in der Astronomie perspektivische Darstellungen mit unmittelbarem Realitätsanspruch auf, als es später darum ging, einzelne durch das Teleskop gesehene Himmelskörper abzubilden.³⁹ Außerdem legten astronomische Abhandlungen großen Wert auf die realistische Abbildung des verwendeten Instrumentariums, um auf diese Weise einen Anteil an der Realitätsrhetorik zu haben.⁴⁰

Was läßt sich nun in Analogie zu Kemps Analyse über die Rhetorik der Simulationsvisualisierung aussagen?

In Abschnitt 4.4.2 wurde gezeigt, daß die Simulationsvisualisierung eine eigene Kombination von Stilmitteln aufweist, die sich zu einer spezifischen Simulationsrhetorik zusammenfügen. Simulationsbilder erheben dabei nicht direkt, wie etwa die Körperbilder der Renaissance, den Anspruch, etwas wirklich Gesehenes abzubilden. Abgesehen von einigen verkaufsorientierten Anwendungen ist es noch nicht einmal in erster Linie beabsichtigt, die abgebildeten Vorgänge täuschend ähnlich der Beobachterperspektive darzustellen, wie es bei Teilen der Virtual Reality Anwendungen der Fall ist. Wohl aber sollen Simulationsbilder einen konkreten Vorgang, der tatsächlich stattfinden und dann mit bloßem Auge oder mit dem geeigneten Instrumentarium auch beobachtet werden könnte, repräsentieren.

Dabei richtet sich, wie es oben beschrieben wurde, die Darstellung vor allem auch auf den Verlauf „innerer Größen“ des Geschehens. Ähnlich wie die Adern und Fasern in einem aufgeschnittenen Arm werden auf einem Simulationsbild innere Linien in aufgeschnittenen festen Körpern präsentiert. Im Gegensatz zu dem Körperbild jedoch zielt das Simulationsbild nicht primär auf Authentizität, sondern vor allem auf eine tiefere, strukturelle Erfassung des Geschehens. Damit rückt es eher in die Nähe der abstrakten Diagramme der Renaissance-Astronomie. Anders als bei den astronomischen Bahnrechnungen kann es mit Simulationsbildern jedoch weitgehend gelingen, den hypothetischen Charakter der präsentierten Modellrechnungen aus dem Bild zu verdrängen, wenn Elemente des Berechnungsverfahrens wie das Gitter oder der Modellansatz nicht in der Abbildung auftauchen. Besonders deutlich wird dies, wenn man vergleicht, wie ein Problem gelöst wird, vor dem Himmelsbild und Simulationsbild gleichermaßen stehen, nämlich das der Darstellung einer zeitlichen Entwicklung. Während die Renaissance-Astronomen ihre berechneten Bahnen direkt in das Bild eintrugen und damit einen Verfremdungseffekt erzeugten, wird das Ergebnis einer Simulationsrechnung im Extremfall als Animation, in der sich die berechnete Bewegung der Körper in „Echtzeit“ vollzieht, präsentiert.

39 Vgl. ebd. S. 80.

40 Vgl. ebd. S. 71.

Simulationsbilder lassen sich somit keiner der beiden Sprechweisen wissenschaftlicher Illustrationen eindeutig zuordnen. Vielmehr verbinden sich in ihnen die Wirklichkeitsrhetorik und die Überzeugungskraft analytischer Präzision zu einem besonders wirkmächtigen Gesamtbild. Daß diese Kombination einen sehr weitreichenden Anspruch auf Sichtbarmachung begründen kann, zeigt – beispielhaft für viele ähnlich gerichtete Statements – folgende Einschätzung zweier Simulationsingenieure:

„Der griechische Philosoph Platon betrachtete die ‚Mimesis‘, die Imitation der Natur, als Grundanliegen der Kunst. Dabei meinte er allerdings nicht die Nachahmung der Erscheinung, sondern die Abbildung der in ihr verborgenen Idee. Ist aber nicht gerade die grafische Darstellung physikalischer Größen wie etwa ‚Konzentration‘, ‚Energie‘ oder ‚Zeit‘ die Abbildung einer ‚Idee‘ und damit Kunst im antiken Verständnis?“ Metzen/Lang (1996, S. 24).

5 **Schlußfolgerungen und Ausblick**

Zu Beginn dieser Arbeit wurde als Hintergrund der Untersuchung eine gesellschaftswissenschaftliche Perspektive auf Technikentwicklung vorgestellt. Die Herausbildung eines technikwissenschaftlichen Methodenkanons wurde dort als Teil einer gesamtgesellschaftlichen Entwicklung beschrieben. Die Methoden der Generierung technischen Wissens bilden sich, so die entwickelte These, unter dem Einfluß des sozialen und kulturellen Kontextes, gerade so heraus, daß die auf ihrer Basis entworfenen technischen Artefakte bestimmte soziotechnische Strukturen stabilisieren. In diesem Sinne wurde vermutet, daß mit der Etablierung von Computersimulation als einer wesentlichen Methode der Generierung technischen Wissens eine charakteristische Form des Wirkens materieller Komponenten in sozialen Strukturen einhergeht. Diese These kann nach der ausführlichen Untersuchung sehr verschiedener Aspekte der simulationsbasierten Technikentwicklung in modifizierter Form aufrechterhalten werden.

Es hat sich deutlich gezeigt, daß Modellierung und Computersimulation – ganz gleich welcher Art – als äußerst wirkungsmächtige Instrumente dazu eingesetzt werden, bestehende soziotechnische Ordnungen zu stabilisieren. Dabei erwies sich vor allem die digitale Form des durch Simulation produzierten Wissens als ein Garant für seine Wirkmächtigkeit. Die Codierung in der Sprache des Computers beschleunigt die Wissensproduktion, indem sie es in neuem Umfang ermöglicht, Wissensanteile zu variieren und zu kombinieren. Die Passung mit anderen computergestützten Wissenssystemen erlaubt zahlreiche weitere Verarbeitungen der erzielten Ergebnisse, während die weltweite Vernetzung von Computern eine hohe Mobilität garantiert. Computersimulation fungiert somit erfolgreich als ein Stabil-Mobil, wie es von Bruno Latour als idealer Wissenstransporter beschrieben worden ist.¹ Ihr Einsatz vermehrt eindeutig die Möglichkeiten, aus wenigen Zentren heraus weitverstreute Dinge zu kontrollieren.

Eine solche Verbreitung von Wissenstechniken, die eine immer effektivere Beherrschung von Welt nach vermeintlich rationalen Kriterien ermöglichen, ist kein neues Phänomen. Schon Max Weber kennzeichnete die kognitive Rationalisierung als einen wesentlichen Bestandteil der von ihm beschriebenen „Entzauberung der Welt“ in westlichen kapitalistischen Gesellschaften.² Die Verbreitung von Methoden der Computersimulation kann für den Bereich des technischen Wissens als ein Bestandteil dieser Entwicklung interpretiert werden. Wie in dieser Untersuchung gezeigt wurde, ist jedoch eine lange Kette mühseliger Transformationen notwendig, damit formale Modelle Instrumente zur Intervention in die Welt werden und simuliertes Wissen Objekte in der Welt mobilisieren kann. Diese Umformungen betreffen nicht nur die materiellen Anteile sozialer Zusammenhänge, sondern deren gesamte Ordnung. So wurde eine Vielzahl verschiedener Weisen von Koproduktionen sozialer und technischer Strukturen innerhalb simulationsgestützter Technikentwicklung aufgezeigt. Sowohl in der Produktion und Entwicklung technischer Artefakte als auch in ihrem Zusammenwirken mit der Umgebung bilden sich – vermittelt über Modellierung und Computersimulation – soziotechnische Strukturen aus, die weitreichende Interventionen, Umformungen und Kontrollmaßnahmen ermöglichen. Darüber hinaus erlauben es die Visualisierungstechniken, einerseits gezielte visuelle Argumente an die Öffentlichkeit zu richten, und andererseits den Eindruck zu verbreiten, mit der Hilfe von Computersimulation werde die Welt in ihrem Innersten durchleuchtet und dabei eine

1 Vgl. Abschnitt 1.4.1.

2 Vgl. Abschnitt 1.1.

natürliche Schönheit zu Tage gebracht. Damit werden über Artefakte und Visualisierungen technikwissenschaftliche Welt-Bilder doppelt wirksam rekontextualisiert.

Die Untersuchung hat ergeben, daß sich wegen der beschleunigenden und effektivierenden Wirkung von Computersimulation mit ihrer Anwendung viele problematische Konsequenzen der Technisierung sozialer Strukturen verstärken. Darunter fallen etwa ein hoher Bedarf an Sicherungs- und Kontrollmaßnahmen bei dem Betrieb technischer Systeme, die Verringerung der Einflußmöglichkeiten vieler Akteure auf ihr Zusammenwirken mit technischen Systemen, die Verstärkung von zentraler Kontrolle gegenüber lokaler Gestaltung technischer Entwicklung und die Beförderung hochspezialisierter, komplexer technischer Geräte mit geringer Flexibilität für Eigenaktivitäten der verarbeiteten Weltausschnitte und der Nutzerinnen und Nutzer. Alle diese Phänomene tragen zu einer verstärkten Produktion von Nebenwirkungen bei, wie sie von Kritikerinnen und Kritikern technisch-wissenschaftlichen Fortschritts häufig als diesem immanent genannt werden.³ Dabei wurde festgestellt, daß umso weitreichendere Umformungen sowie strengere Kontrollen und Disziplinierungen der Elemente und der Umgebung technischer Systeme nötig werden, je weniger lokale Wissensressourcen in die Formalisierung einbezogen wurden, und je weiter sich die formalisierten Bereiche erstreckten. Daher kann für die Methoden der Computersimulation zwar bestätigt werden, daß die Formalisierung und damit die Abtrennung des Wissens von lokalen Entstehungsbedingungen und Personenbindungen zunächst erweiterte Möglichkeiten für Zugriff und Kontrolle bietet, wie es auch für die Formalisierungen der Informationstechnologien der Fall ist.⁴ Dieser Gewinn könnte sich jedoch als ein Kontrollverlust erweisen, wenn die perfekt gesteuerten technischen Systeme unkontrollierbare Nebenwirkungen produzieren.⁵

Bei den Untersuchungen der konkreten Simulationstechniken hat sich allerdings auch gezeigt, daß der enge Zusammenhang zwischen Formalisierung und Disziplinierung nicht der Methode der Computersimulation inhärent ist. Zwar wurde die Vermutung bestätigt, daß die Modellierung als Basis von Technikentwicklungen das einzubringende Wissen erheblich strukturiert und viele Wissensbestandteile aus dem Prozeß der Wissensanwendung ausschließt. Für keinen der Modellierungsansätze war es jedoch möglich, aus dem Ansatz selbst eine eindeutige Klassifizierung des mit seiner Hilfe produzierten Wissens im Hinblick auf seine gesellschaftliche Wirkung vorzunehmen. Zwar wies jedes Verfahren charakteristische „Wissensformatierungen“ auf, diese wirkten sich jedoch jeweils sehr verschieden auf den Verlauf der Technikentwicklung aus.

Auch im Hinblick auf die Art des Wissens, das sich innerhalb von Computersimulationen manifestiert, war das Ergebnis nicht eindeutig. Alle drei Modellierungsansätze erwiesen sich als epistemologische Mischformen und können damit keinesfalls ohne weiteres als Bestandteil kognitiver Rationalisierung verstanden werden. Damit wurde

3 Vgl. Böhme (1992a Kapitel 1)

4 Vgl. Schmiede (1996)

5 Vgl. etwa Unseld (1993): „Je mehr Gültigkeit und je mehr Macht wir jedoch auf diese Weise unseren Erklärungen in der Welt verschaffen, desto mächtiger wirken in der Welt auch jene Prozesse, die die Grenzen unseres Wissens und unserer Macht demonstrieren. Und inzwischen haben wir es in diesem Wettlauf so weit gebracht, daß die Summe der Nebenwirkungen schneller wächst als die Summe der intendierten Wirkungen, und wir heute nicht mehr sicher sein können, ob nicht die Nebenwirkungen in einer globalen Katastrophe die eigentlich intendierten Wirkungen in toto zunichte machen werden.“

die verbreitete Vorstellung in Frage gestellt, daß aus naturwissenschaftlichen Weltbeschreibungen mit der Hilfe von moderner Rechner Technik immer mehr in der Welt vorhandene Wirkungszusammenhänge direkt abgeleitet werden können. Eine solche Entmystifizierung des simulierten Wissens widerspricht jedoch nicht einer Interpretation dieser Methode der Wissenserzeugung als Bestandteil einer formalen Rationalität, die bemüht ist, die Phänomene der Welt zu berechenbaren und beherrschbaren Größen umzuformen. Die Wirkmächtigkeit dieser Wissenstechniken ist aber nicht in einer speziellen kognitiven Struktur begründet, sondern beruht auf einer Vielzahl von Praktiken, die formale Struktur und komplexe Wirklichkeit einander anpassen. Dabei sind die Techniken der Verbildlichung des Anspruchs auf spielerische Beherrschbarkeit der Welt ein wichtiger Bestandteil der Stabilisierung der simulierten Welten.

Dennoch erlaubt es meines Erachtens gerade die aufgezeigte Divergenz innerhalb der untersuchten technischen Methoden, fruchtbare Ansatzpunkte für die Auseinandersetzung mit Technikentwicklung zu entwickeln. Dabei bedeutet die Auffassung, technische Methodik sei von ihrem sozialen und kulturellen Kontext geprägt, keinesfalls, daß eine einfache politische Steuerbarkeit technischer Entwicklungen gegeben wäre. Im Gegenteil ist es gerade die enge Verflechtung materieller und sozialer Komponenten, die soziotechnischen Strukturen eine hohe Stabilität verleiht. So wurde deutlich, daß bei Technikentwicklungen, die auf der Grundlage von Computersimulation vorgenommen werden, schon durch die Modellierung vorgeprägt wird, welche Eigenschaften die entwickelte Technik später aufweist. Damit müssen Studien, in denen die Richtung von Technikentwicklung als das Ergebnis von Aushandlungsprozessen verschiedener Akteursgruppen interpretiert wird, um eine Dimension erweitert werden. Für moderne technische Systeme, die in zunehmenden Maße auf Formalisierungen von Welt beruhen, wie sie hier beschrieben wurden, muß dieser Aushandlungsprozeß bis in die Wahl des Modellierungsansatzes hinein und von dort aus weiter über die einzelnen Modellierungsentscheidungen verfolgt werden, wenn die Gesellschaftlichkeit materieller Strukturen analysiert werden soll. Es reicht hier nicht, die Prozesse zu untersuchen, die zu der Auswahl schon fertig entwickelter Technologievarianten führen. Sozialwissenschaftliche Technikforschung muß sich demnach sehr weitgehend auf technisches Terrain wagen und die technikwissenschaftlichen Methoden selbst einer Ideologiekritik unterziehen. Kulturwissenschaftliche Disziplinen müssen ein Instrumentarium für die Interpretation technikwissenschaftlicher Bilder entwickeln. Auch die Computersoftware, die entscheidende Strukturierungen in die Generierung von Wissen und Bildern einbringt, muß als Bestandteil einer soziotechnischen Konfiguration untersucht und hinterfragt werden.

Um in den Prozeß simulationsgestützter Technikentwicklung sinnvoll eingreifen zu können, ist es entscheidend, daß die Modellierung von Welt, wie es hier entwickelt wurde, als soziale Konstruktion eines funktionierenden Zusammenhanges zwischen formaler Beschreibung, materiellen Strukturen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen und nicht als neutrale Abbildung von vorgefundener Welt verstanden wird. Dies gilt aber vor allen Dingen für die beteiligten Akteure selbst. Nur wenn Ingenieurinnen und Ingenieure die gesellschaftliche Dimension ihrer Modellierungsentscheidungen bewußt in ihre Urteile und Entscheidungen einbeziehen, besteht eine echte Chance dafür, ein Wissen zu generieren, das dem gegenwärtigen Trend zur Ausweitung wenig „sozialverträglicher“ technischer Systeme entgegengesetzt werden kann.

Denn ein solches Wissen muß, das haben die Untersuchungen mit aller Deutlichkeit gezeigt, aktiv in einer intensiven Auseinandersetzung mit lokalen Gegebenheiten generiert werden. Dabei wirken zahlreiche Strukturierungen, die zugunsten reibungsloser Effektivierung der Technikentwicklung vorgenommen werden, erschwerend. Daß es dennoch möglich ist, auf diese Weise mit der Hilfe von Modellierung und Computersimulation zukunftsweisende Koproduktionen sozialer und materieller Strukturen zu gestalten, zeigten einige der hier geschilderten Ansätze von Akteuren der Technikentwicklung. Diese Ansätze zu stärken, indem Inhalte aus den Geistes- und Sozialwissenschaften in die Ingenieurausbildung einbezogen werden, wäre sicherlich eine lohnende Investition für eine zukunftsfähige Technikentwicklung.

6 Literaturverzeichnis

- Achenbach, Manfred (1997): Bessere Dichtungen mit dem Computer? In: Der Konstrukteur 9/1997. S. 92-93.
- Anderson, J.D., Jr. (1984): Fundamentals of Aerodynamics. New York, St Louis, u. a.
- Anderson, J.D., Jr. (1996): Basic Philosophy of CFD. In: J.F. Wendt (ed.): Computational Fluid Dynamics. An Introduction. Berlin, Heidelberg, New York.
- Beaverstock, Malcolm C. (1993): It takes knowledge to apply neural networks for control. In: ISA Transactions 32. S. 235-240.
- Beitz, Wolfgang/ Karl-Heinz Küttner (1987): Taschenbuch für den Maschinenbau / Dubbel. 16. korrigierte und ergänzte Auflage. Berlin, u.a..
- Beniger, James R. (1986): The Control Revolution. Technological and Economic Origins of the Information Society. Cambridge MA, London.
- Bhat, Naveen. V. u. a. (1990): Modelling Chemical Process Systems via Neural Computation. In: IEEE Control Systems Magazine. April 1990. S. 24-30.
- Bieker, B/ G. Schmidt (1985): Fuzzy Regelungen und linguistische Regelalgorithmen - Eine kritische Bestandsaufnahme. at - automatisierungstechnik. Jahrgang 33, Heft 2. S. 45-52.
- Bijker, Wiebe/ John Law (eds.) (2000): Shaping Technology/Building Society. Studies in Sociotechnical Change. Third Printing. (First Printing 1992). Cambridge, MA u.a.
- Billerbeck, Jens. D./ Regine Bönsch (1991): Fuzzy: Unscharfe Logik zieht scharfe Schlüsse. VDI nachrichten. 17. Mai. S. 13.
- Böhme, Gernot (1978): Autonomisierung und Finalisierung. In: Ders./ Wolfgang van den Daele u. a. (Hrsg.): Die gesellschaftliche Orientierung des wissenschaftlichen Fortschritts. Frankfurt am Main. S. 69-130.
- Böhme, Gernot (1992a): Coping with Science. Boulder.
- Böhme, Gernot (1992b): Natürlich Natur. Über Natur im Zeitalter ihrer technischen Reproduzierbarkeit. Frankfurt am Main.
- Böhme, Gernot (1997): Strukturen und Perspektiven der Wissensgesellschaft. In: Divinatio - Studia Culturologica Series. Vol. 5, Autumn - Winter 1997. S. 53-74.
- Böhme, Gernot/ Wolfgang van den Daele/ Rainer Hohlfeld (1978): Finalisierung revisited. In: Dieselben u. a. (Hrsg.): Die gesellschaftliche Orientierung des wissenschaftlichen Fortschritts. Frankfurt am Main. S. 195-250.

Borck, Cornelius (2001): Die Unhintergebarkeit des Bildschirms: Beobachtungen zur Rolle von Bildtechniken in den präsentierten Wissenschaften. In: Bettina Heintz und Jörg Huber (Hrsg.): Mit dem Auge denken: Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und vituellen Welten. Wien, New York. S. 383-394.

Bossel, Hartmut (1992): Modellbildung und Simulation: Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme. Braunschweig, Wiesbaden.

Bredekamp, Horst (1997): Das Bild als Leitbild. Gedanken zur Überwindung des Anikonismus. In: Ute Hoffmann/ Bernward Joerges/ Ingrid Severin (Hrsg.): LogIcons. Bilder zwischen Theorie und Anschauung. Berlin. S. 225-245.

Cardon, H.R.A. und R. Hoogstraten (1995): Key Issues for Successful Industrial Neural Network Applications: an application in Geology. In: Braspenning P. J. u. a. (eds.): An Introduction to Artificial Neural Networks Theory and Praxis. Berlin. S. 235-245.

Carlson, Bernard W. (2000): Artifacts and Frames of Meaning: Thomas A. Edison, His Managers, and the Cultural Construction of Motion Pictures. In: Wiebe Bijker/ John Law (eds.): Shaping Technology/ Building Society. Studies in Sociotechnical Change. Third Printing. (First Printing 1992). Cambridge, Mass. S. 175-198.

Cartwright, Nancy (1983): How the Laws of Physics Lie. Oxford.

Cartwright, Nancy (1999): Models and the limits of theory: quantum Hamiltonians and the GCS models of superconductivity. In: Mary S. Morgan/ Margaret Morrison (eds.): Models as Mediators. Perspectives on Natural and Social Science. Cambridge. S. 241-281.

Carrier, Martin (1996): Stichwort „Theorieauffassung, semantische“. In: Jürgen Mittelstraß (Hrsg.): Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie. Band 4. Stuttgart, Weimar. S. 271-272.

Chapman, Dean R. (1979): Computational Aerodynamics Development and Outlook. AIAA Journal, Vol 17, No. 12, December 1979, S. 1293-1313.

Deigaard, Torkil (1995): Introducing Neural Networks to the Cement Industry. In: EUFIT August 1995, Proceedings Vol 2. Aachen. S. 970-974.

Dierkes, Meinolf/ Ute Hoffmann/ Lutz Marz (1992): Leitbild und Technik – zur Entstehung und Steuerung technischer Innovationen. Berlin.

Drtna, Peter/ Matthias Krause (1996): Sandabrasion im Griff. In: Sulzer Technical Review 1/96, S. 32-35.

Elzinga, Aant (1998): Theoretical Perspectives: Culture as a Ressource for Technological Change. In: Mikael Hård/ Andrew Jamison (eds): The Intellectual Appropriation of Technology: Discourses on Modernity. 1900-1939. Cambridge, Mass.

Emenlauer-Blömers, Eva/ Waltraud Kreutzer und Thomas Rudek (1990): Mit Globus die Welt im Griff. Computersimulation als modernes Herrschaftsinstrument. Wechselwirkung Nr. 44, Februar 1990. S. 30-34.

Feldbausch, E./ H. Friedmann (1998): Hand in Hand. Entwicklungspartnerschaft bei der Projektsimulation. In: konstruktionspraxis Nr.3 - März 1998, 9.Jg., S. 26-30.

Ferguson, Eugene, S. (1993): Das innere Auge: Von der Kunst des Ingenieurs. Basel, Boston, Berlin.

Floyd, Christiane (1992): Software Development as Reality Construction. In: Christiane Floyd/ Heinz Züllighofen u.a. (eds): Software Development and Reality Construction. Berlin, Heidelberg. S. 86-100.

Friese, Heidrun und Peter Wagner (1997): Bild und Wissen. Reflexionen und Erkenntnis in den Sozialwissenschaften. In: Ute Hoffmann/ Bernward Joerges/ Ingrid Severin (Hrsg.): LogIcons. Bilder zwischen Theorie und Anschauung. Berlin. S. 207-222.

Fröhlich, Peter (1995): FEM-Leitfaden. Einführung und praktischer Einsatz von Finite-Element-Programmen. Berlin, Heidelberg.

Froese, Thomas/ Nicholas Vollmer (1995): Predictive Control with Neuronal Networks and Fuzzy Control. In: EUFIT August 1995, Proceedings, Vol 2. Aachen. S. 1008-1015.

Furger, Franco/ Bettina Heintz (1997): Technologische Paradigmen und lokaler Kontext. Das Beispiel der ERMETH. Swiss Journal of Sociology, 23 (3), 1997, S. 533-566

Gariglio, Daniel (1991): Fuzzy in der Praxis. Elektronik 20. S. 63-75.

Georges, Thomas/ Christina Hackmair u. a. (1998): Lebensdauersimulation an Tragfedern im Abgleich mit experimentell ermittelten Ergebnissen. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 100.S. 904-909.

Gersten, Klaus (1991): Einführung in die Strömungsmechanik. Braunschweig, Wiesbaden.

Goldman, Steven L. (1991): The Social Captivity of Engineering. In: Paul T. Durbin (ed.): Critical Perspectives on nonacademic Science and Engineering. Betlehem, London, Toronto. S. 121-145.

Graves, Randolph A. JR. (1982): Computational Fluid Dynamics. The Coming Revolution. In: *Astronautics and Aeronautics*, Vol 20, No. 3, March 1982, pp. 20-28.

Haars, Silke (1997): Fuzzy-Logik wird zur Computational Intelligence. In: *VDI nachrichten*. Nr. 7, 14. Februar. S. 15.

Hack, Lothar und Irmgard Hack (1985): Die Wirklichkeit, die Wissen schafft. Zum wechselseitigen Begründungsverhältnis von „Verwissenschaftlichung der Industrie“ und „Industrialisierung der Wissenschaft“. Frankfurt, New York.

Hacking, Ian (1983): Representing and Intervening. Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science. Cambridge.

Hacking, Ian (1992): The Self-Vindication of the Laboratory Sciences. In: Andrew Pickering (ed): *Science as Practice and Culture*. Chicago. S. 29-64.

Hacking, Ian (1999): Was heißt soziale Konstruktion. Frankfurt a.M.

Hafner, Sigrid (1994) (Hrsg.): Neuronale Netze in der Automatisierungstechnik. München, Wien.

Hafner, Sigrid/ H. Geiger/ U. Kreßel (1994): Neuronale Netze: Einführung und Begriffswelt. In: Sigrid Hafner (Hrsg.): *Neuronale Netze in der Automatisierungstechnik*. München, Wien. S. 9-30.

Hård, Mikael (1993): Beyond Harmony and Consensus: A Social Conflict Approach to Technology. *Science, Technology and Human Values*, Vol 18, No. 4, S. 408-432.

Hård, Mikael (1994a): Technology as Practice: Local and Global Closure Processes in Diesel-Engine Design. *Social Studies of Science* (SAGE, London, Thousand Oaks and New Delhi), Vol. 24, S. 549-585.

Hård, Mikael (1994b): Machines are Frozen Spirit. The Scientification of Refrigeration and Brewing in the 19th Century - A Weberian Interpretation. Frankfurt am Main.

Hartmann, Stephan (1995): Stichwort „Simulation“. In: Jürgen Mittelstraß (ed.): *Enzyklopädie für Philosophie und Wissenschaftstheorie*. Band 3. Stuttgart. S. 807-809

Hartmann, Stephan (1996): The World as a Process. Simulations in the Natural and Social Sciences. In: R. Hegselmann/ U. Mueller/ K.G. Troitzsch (eds.): *Modelling and Simulation in the Social Sciences from the Philosophy of Science Point of View*. Dordrecht 1996, S. 77-100.

Henderson, Kathryn (1999): On Line and On Paper. Visual Representations, Visual Culture, and Computer Graphics in Design Engineering. Cambridge u. a.

- Heintz, Bettina (1993): Die Herrschaft der Regel. Frankfurt/Main, New York.
- Heintz, Bettina/ Jörg Huber (2001): Der verführerische Blick: Formen und Folgen wissenschaftlicher Visualisierungsstrategien. In: Dieselbn. (Hrsg.): Mit dem Auge denken: Strategien der Sichtbarmachung in wissenschaftlichen und virtuellen Welten. Wien, New York. S. 9-40.
- Hertz, Heinrich (1894): Die Prinzipien der Mechanik. Leipzig.
- Hinderer, Wolfgang (1992): Systemtheorie - Informatik - Physik - Mathematik - Ingenieurwissenschaften. Thesen einer Verbindung unter dem Gesichtspunkt von Realität und Modell. In: Wechselwirkung Nr. 57 Oktober 1992. S. 25-28.
- Hoffmann, Norbert (1993): Kleines Handbuch neuronale Netze. Braunschweig; Wiesbaden.
- Holmblad, Lauritz, P./ Jens-Jorgen Østergaard (1982): Control of a Cement Kiln by Fuzzy Logic. In: M.M. Gupta/ E. Sanchez (eds.): Fuzzy Information and Decision Processes. North-Holland. S. 389-399.
- Humphreys, Paul (1990): Computer Simulations. In: A. Fine/ M. Forbes/ L. Wessels (eds.): Proceedings of the 1990 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association (PSA) 1990, Volume 2, East Lansing Mich. 1991, S. 497-506.
- Humphreys, Paul (1995/96): Computational Empirism. In: Foundations of Science 1, pp. 119-130.
- Isermann, R. (1997): Theoretische Modellbildung dynamischer Systeme. In: Tagungsbericht zu dem Workshop: Rechnergestützte Modellbildung dynamischer Systeme vom 29.10.1997. SFB 241 (IMES) TU- Darmstadt.
- Isphording, Frank (1991): Elektronik verhilft zum gelungenen Schnappschuß. VDI nachrichten. Nr. 20, 17. Mai. S. 34.
- Jasanoff, Sheila u. a. (1995): Handbook of Science and Technology Studies. Thousand Oaks, London, New Delhi.
- Jäger, Willi (1992): Simulation und Natur. Die mathematisch gedeutete Natur. In: Ludger Honnefelder (Hrsg.): Natur als Gegenstand der Wissenschaften. Freiburg. S. 27-85.
- Kahlert, Jörg (1995): Fuzzy Control für Ingenieure. Braunschweig/Wiesbaden.
- Kaiser, Walter (1997): Technisierung des Lebens seit 1945. In: Wolfgang König (Hrsg.): Propyläen Technikgeschichte. Unveränderte Neuauflage. Band 5. Berlin, Frankfurt am Main. S. 283-529.

Kaufmann, William J./ Larry L. Smarr (1994): *Simulierte Welten: Moleküle und Gewitter aus dem Computer*. Heidelberg, Berlin, Oxford.

Keck, Helmut und Peter Drtina: Strömungsberechnung für die ganze Turbine. In: *Sulzer Technical Review* 1/97. S. 26-29.

Kemp, Martin (1996): *Temples of the Body and Temples of the Cosmos: Vision and Visualisation in the Vesalian and Copernican Revolutions*. In: Brian S. Baigrie (ed.): *Picturing Knowledge. Historical and Philosophical Problems Concerning the Use of Art in Science*. Toronto, Buffalo, London. S. 40-85.

Keuthen, Michael/ Andreas Seeliger/ Steve Thornton (1995): *Neural net for Process Condition Prediction in Steelmaking*. In: *EUFIT August 1995, Proceedings Vol 1*. Aachen. S. 304-309.

Kisza, J.B./ M.E. Kochanska/ D.S. Sliwinska (1985): *The Influences of Some Parameters on the Accuracy of a Fuzzy Model*. In: Michio Sugeno: *Industrial Applications of Fuzzy Control*. Amsterdam, New York, Oxford. S. 187-230.

Kleeberger, Michael (1996): *Nichtlineare dynamische Berechnung von Gittermast-Fahrzeugkranen*. Hochschulschrift: München, Techn. Univ., Diss.

Klein, Bernd (1997): *FEM. Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode*. Braunschweig, Wiesbaden

Knie, Andreas (1997): *Technik als gesellschaftliche Konstruktion, Institutionen als soziale Maschinen - Perspektiven der Technikgestaltung*. In: Meinolf Dierkes (Hg.): *Technikgenese : Befunde aus einem Forschungsprogramm*. Berlin. S. 225 -243.

Knorr Cetina, Karin (1995): *Laboratory Studies. The Cultural Approach to the Studie of Science*. In: Sheila Jasanoff et. al. (ed.): *Handbook of science and technology studies*. Thousand oaks, California. S. 140-166.

König, Wolfgang (1999): *Künstler und Strichezieher. Konstruktions- und Technikkulturen im deutschen, britischen, amerikanischen und französischen Maschinenbau zwischen 1850 und 1930*. Frankfurt am Main.

Kosko, Bart (1993): *fuzzy-logisch. Eine neue Art des Denkens*. Hamburg.

Kosko, Bart (1997): *Fuzzy Engineering*. Prentice-Hall, London, u. a.

Küpper, Klaus (1995): *Zur Modellierung technischer Systeme mittels Fuzzy-Logik*. Dissertation an der Uni-GH Duisburg. VDI-Verlag Nr. 507.

Kruse, Rudolf/ Jörg Gebhardt/ Frank Klawonn (1995): *Fuzzy Systeme*. Stuttgart.

Latour, Bruno (1983): Give me a Laboratory and I will Raise the World. In: Karin Knorr-Cetina/ Michael Mulkay (eds.): Science observed. Perspectives on the Social Study of Science. London et al. S. 141-170.

Latour, Bruno (1987): Science in Action: How to Follow Scientists and Engineers Through Society. Cambridge.

Latour, Bruno (1988): Drawing things together. In: Michael Lynch und Steve Woolgar (eds.): Representation in Scientific Practice. Kluwer Academic Publishers. S. 19-68.

Latour, Bruno (2000): Die Hoffnung der Pandora. Frankfurt am Main.

Law, John/John Whittacker (1988): On the art of representation: notes on the politics of visualisation. In: Gordon Fyfe und John Law (eds.) Picturing Power: Visual Depiction and Social Relations. London, New York. S. 160-183.

Law, John (1991): Introduction: monsters machines and sociotechnical relations. In: Ders. (ed.): A Sociology of Monsters. Essays on Power Technology and Domination. London, New York.

Lu, Yong-Zai/ Min He/ Chen-Wei Xu (1997): Fuzzy Modeling and Expert Optimization Control for Industrial Processes. In: IEEE Transactions On Control Systems Technology, Vol. 5, No. 1, January 1997. S. 2-12.

Lynch, Michael/Samuel Y. Jr Edgerton (1988): Aesthetics and digital image processing: Representational craft in contemporary astronomy. In: Gordon Fyfe und John Law (eds.) Picturing Power: Visual Depiction and Social Relations. London, New York. S. 184-220.

Lynch, Michael/Woolgar, Steve (1988): Introduction. In: Dieselbn. (eds.): Representation in Scientific Practice. Cambridge MA. S. 1-18.

MacKenzie, Donald (1996): Nuclear Weapons Laboratories and the Development of Supercomputing. In: Ders. (ed.): Knowing machines: essays on technical change. Cambridge Mass. u. a., S. 99-129.

Marcuse, Herbert (1970): Der eindimensionale Mensch. Studien zur Ideologie der fortgeschrittenen Industriegesellschaft. Ungekürzte Sonderausgabe herausgegeben von Heinz Maus und Friedrich Fürstenberg. Neuwied und Berlin.

Marquardt, Wolfgang (1997): MODKIT - Eine offene Umgebung zur rechnergestützten Modellierung verfahrenstechnischer Prozesse. In: Workshop - Rechnergestützte Modellbildung dynamischer Systeme vom 29.10.1997. Technische Universität Darmstadt.

MATLAB (1995): MATLAB News & Notes. The Newsletter for MATLAB®, SIMULINK®, and Toolbox Users. Spring 1995.

- Mattern, Friedemann (1995): Simulation als Grundprinzip des wissenschaftlichen Rechnens. In: *thema Forschung* 2/95. S. 14-25.
- McNeill, Daniel/Paul Freiberger (1996): Fuzzy Logic. Die „unscharfe“ Logik erobert die Technik. Aktualisierte Taschenbuchausgabe. München.
- Meincke, Thies (1996): Simulation des dynamischen Verhaltens von Kurvengetrieben durch rechnergetützte Modellauswahl mittels unscharfer Modellierung und Fuzzy-Logik. Hamburg.
- Merkel, Edgar (1998): Auslegung von Bajonettverschlüssen. Dissertation am Lehrstuhl Apparate- und Anlagenbau Experimentelle Spannungsanalyse der TU-München.
- Metzen, Gerhard/ Egon Lang (Fa. Sulzer Innotec) (1996): Einblick in Strömungen. *Sulzer Technical Review* 2/96, S. 24-27.
- Minsky, Marvin and Seymour Papert (1969): *Perceptrons*. Cambridge, Mass., u. a.
- Moin, Parviz/ John Kim (1999): Modellieren von Turbulenz. In: *Spektrum der Wissenschaft*. Dossier 2/1999 „Software“. S. 44-50.
- Morrison, Margaret (1998): Modelling Nature: Between Physics and the Physical World. In: Brigitte Falkenberg/ Wolfgang Muschik (eds.): *Philosophia Naturalis*, Band 35, Heft 1, Frankfurt a. M. S. 65-85.
- Morrison, Margaret (1999) : Models as autonomous agents. In: Mary S. Morgan/ Margaret Morrison (eds.): *Models as Mediators. Perspectives on Natural and Social Science*. Cambridge. S. 38-65.
- Morrison, Margaret/ Mary S. Morgan. (1999): Models as mediating instruments. In: Mary S. Morgan/ Margaret Morrison (eds.): *Models as Mediators. Perspectives on Natural and Social Science*. Cambridge. S. 10-37.
- Müller, Günter und Clemens Groth (1999): FEM für Praktiker : die Methode der finiten Elemente mit dem FE-Programm ANSYS; 4., aktualisierte Aufl. Renningen-Malmsheim.
- Nalden, A. (1999): Handeln in Virtualität und Realität - Ein integriertes Lernsystem für das Laserschweissen. Düsseldorf VDI. (Reihe 10 609).
- Nauck, Detlef/ Frank Klawonn/ Rudolf Kruse (1996): Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Braunschweig, Wiesbaden.
- Neumerkel, D. und F. Lohnert (1994): Modellierung und Regelung mit Neuronalen Netzen. In: Sigrid Hafner (Hrsg.): *Neuronale Netze in der Automatisierungstechnik*. München, Wien. S. 31-47.

Otter, Martin (1997): Objektorientierte Modellierung mechatronischer Systeme mit Modelica. In: Tagungsbericht zu dem Workshop: Rechnergestützte Modellbildung dynamischer Systeme vom 29.10.1997. SFB 241 (IMES) TU- Darmstadt.

Pedrycz, Witold/ Fernando Gomido (1998): An Introduction to Fuzzy Sets Analysis and Design. Cambridge, Massachusetts.

Petroski, Henry (1985): To Engineer is Human: The Role of Failure in Successful Design. New York.

Petrovik, Milan (1995): Berechnung der Meridianströmung in mehrstufigen Axialturbinen bei Nenn- und Teillastbetrieb. Düsseldorf. VDI Reihe 7, Nr. 280.

Pfützinger, Ernst Wilhelm (1998): Kennfeldberechnung für Axialverdichter mit systematischer Untersuchung der Verlust und Umlenkeigenschaften von Schaufelgittern. Dissertation am Institut für Strömungsmaschinen der Universität Hannover.

Pickering, Andrew (ed.) (1992): Science as Practice and Culture: Chicago.

Pinch, Trevor/ Wiebe E. Bijker (1987): The Social Construction of Facts and Artifacts: Or How the Sociology of Science and the Sociology of Technology Might Benefit Each Other. In: Wiebe E. Bijker/ Thomas Hughes/ Trevor Pinch (eds.): The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Sociology and History of Technology. Cambridge, Mass. S. 17-50.

Post, Hilde (1991): Verschläft Europa wieder eine neue High-tech-Chance? In: Elektronik 7/1991. S. 90-94.

Profos, Paul (1982): Einführung in die Systemdynamik. Stuttgart.

Rannacher, Rolf/ Erwin Stein (1999): Finite Elemente. In: Spektrum der Wissenschaft. Dossier 2/1999 „Software“. S. 10-17.

Reinhart, Gunther/ Klaus Feldmann (1997): Simulation – Schlüsseltechnologie der Zukunft? Stand und Perspektiven. München.

Reuter, M.A. (1993): Using Neural Nets to Model Metallurgical and Mineral Processing Systems. In: Workshop on Neural Networks at RWTH Aachen, July 1993, Proceedings. S. 194-197.

Ries, Christoph (1996): Experimentelle Untersuchungen und Finite-Elemente Simulation zur Temperaturverteilung im Werkzeug beim Stabziehen. Dissertation an der Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenbau (Institut für Werkstoffumformung) der TU Clausthal.

Rohrlich, Fritz (1990): Computer Simulation in the Physical Sciences. In: A. Fine/ M. Forbes/ L. Wessels (eds.): Proceedings of the 1990 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association (PSA) 1990, Volume 2, East Lansing Mich. 1991, S. 507-518.

Ross, Timothy J. (1995): Fuzzy Logic with Engineering Applications. New York u. a.

Roth, Paul F. (1992): Simulation. In: Encyclopädia of Computer Science. New York. S. 1204-1209.

Schmiede, Rudi (1996): Informatisierung, Formalisierung und kapitalistische Produktionsweise. Entstehung der Informationstechnik und Wandel der gesellschaftlichen Arbeit. In: Ders. (Hrsg.): Virtuelle Arbeitswelten. Arbeit, Produktion und Subjekt in der „Informationsgesellschaft“. Berlin. S. 15-47.

Schöneburg, Eberhard (1993): Industrielle Anwendungen Neuronaler Netze. Bonn, Paris u. a.

Schöneburg, Eberhard/ Roland Straub u. a. (1993): Analyse des Auftriebsphänomens. In: Schöneburg, Eberhard (1993): Industrielle Anwendungen Neuronaler Netze. Bonn, Paris u. a., Kapitel 15, S. 283-301.

Schöllhorn, Michael (1997): Identifikation einer nichtlinearen verfahrenstechnischen Regelstrecke mit Hilfe künstlicher Neuronaler Netze. In: atp - Automatisierungstechnische Praxis. 39 1997-1. S. 34-39.

Schweitzer, G. (1996): Mechatronics - basics, objectives, examples. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Vol 210. S. 1-11.

Schweizerhof, Karl (1999): Von der Kirchenkuppel zum Dampfbügeleisen: Anwendungsvielfalt kommerzieller FEM-Programme. In: Spektrum der Wissenschaft. Dossier 2/1999 „Software“. S. 22-24.

Shapin, Steven und Simon Schaffer (1985): Leviathan and the Air Pump. Hobbes, Boyle and the Experimental Life. Princeton.

Spektrum der Wissenschaft. Dossier 2/1999 „Software“.

Star, Susan Leigh (1991): Distributions of power. Power, technologies and the phenomenology of conventions: on being allergic to onions. In: John Law (ed.): A Sociology of Monsters. Essays on Power Technology and Domination. London and New York.

Suykens, Johan A. K./ Joos P. L. Vandewalle u.a. (1996): Artificial Neural Networks for Modelling and Control of Non-Linear Systems. Boston, Dordrecht, London.

Terai, H. u. a. (1992): Application of Fuzzy Logic Technology to Home Appliances. In: Toshiro Terano/ Michio Sugeno u. a. (1992): Fuzzy Engineering toward Human Friendly Systems. Tokio. S. 1118.

Terano, Toshiro/ Michio Sugeno u. a. (1992): Fuzzy Engineering toward Human Friendly Systems. Tokio.

Topper, David (1996): Towards an Epistemology of Scientific Illustration. In: Brian S. Baigrie (ed.): Picturing Knowledge. Historical and Philosophical Problems Concerning the Use of Art in Science. Toronto, Buffalo, London. S. 215-249.

Trottenberg, Ulrich (1999): Quantensprünge in der numerischen Simulation. In: Spektrum der Wissenschaft. Dossier 2/1999 „Software“. S. 6-9.

Tufte, Edward R. (1990): Envisioning Information. Cheshire, Connecticut.

Ullrich, Otto (1988): Technik und Herrschaft. Vom Handwerk zur verdinglichten Blockstruktur industrieller Produktion. 3. Aufl. Erste Auflage 1979. Frankfurt/Main.

Ulrich, Jörg (1999): Ein Modell zur Simulation von Mikropumpen auf Basis der Finite-Elemente-Methode. Düsseldorf : VDI-Verl.

Unbehauen, Heinz (1992): Regelungstechnik I, 7. überarb. Auflage. Braunschweig, Wiesbaden.

Unsel, Godela (1993): Technisch-wissenschaftliche Kultur und das Beispiel der Informatik. In: Peter Schefe u. a. (Hrsg.): Informatik und Philosophie. Mannheim u. a., S. 247-259.

Urban, Dieter (1986): Technikentwicklung. Zur Soziologie technischen Wissens. Stuttgart.

VDI-Richtlinie 2221 (1986): Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf.

VDI-Richtlinie 2225 (1977): Technisch-wirtschaftliches Konstruieren. Düsseldorf.

VDI-Richtlinie 3633 (1996): Simulation von Logistik-, Materialfluß und Produktionssystemen. Düsseldorf.

Voutchkov, K./ K. D. Velev (1997): Identification of Waste Water Treatment Plant Using Neural Networks. In: Bernd Reusch (ed.): Computational Intelligence. Theory and Application. International Conference 51h Fuzzy Days, Dortmund. Germany April 1997, Proceedings S. 478-483.

Wajcman, Judy (1994): Technik und Geschlecht. Die feministische Technikdebatte. Frankfurt/Main.

Wassermann, Philip D. (1989). Neural Computing. New York u.a.

Wenzel, Helmut: Die Technisierung des Subjekts im Zeitalter der Information. Zum Verhältnis von Individuum, Arbeit und Gesellschaft heute. In: Rudi Schmiede (Hrsg.): Virtuelle Arbeitswelten. Arbeit, Produktion und Subjekt in der Informationsgesellschaft. Berlin. S. 179-200.

Wolters, Gereon (1995): Stichwort „Modell“. In: Jürgen Mittelstraß (Hrsg.): Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie. Band 2. Stuttgart, Weimar. S. 911-913.

Yagashita, O./ O. Itoh (1985): Application of Fuzzy Reasoning to the Water Purification Process. In: Michio Sugeno: Industrial Applications of Fuzzy Control. Amsterdam, New York, Oxford. S. 19-39.

Yasunobu, S. und S. Miyamoto (1985): Automatic Train Operation System by Predictive Fuzzy Control. In: Michio Sugeno: Industrial Applications of Fuzzy Control. Amsterdam, New York, Oxford. S. 1-18.

Zell, Andreas (1994): Simulation Neuronaler Netze. Bonn, Paris u. a.

Zhai, Junnai (1996): Analyse und Optimierung der internen Windkanalwaage mit FEM. Dissertation am Fachgebiet für Aerodynamik und Meßtechnik der TH Darmstadt.